



**Universidade de Aveiro**  
**Ano 2014**

Departamento de Engenharia de Materiais e  
Cerâmica

**Lénia Patrícia Brites  
Pereira**

**Componentes poliméricos de alto desempenho para  
a Indústria Automóvel**





**Lénia Patrícia Brites  
Pereira**

**Componentes poliméricos de alto desempenho para  
a Indústria Automóvel**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica da Doutora Elisabete Costa, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro, co-orientação do Doutor Martinho Oliveira, Professor Coordenador de Escola Superior Aveiro Norte e, na empresa, sob a orientação do Engenheiro Cláudio Domingues.



“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein



## **júri**

presidente

Prof. Doutora Paula Celeste da Silva Ferreira  
equiparada a investigadora principal da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Manuel Godinho Completo  
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Maria Elisabete Jorge Vieira da Costa  
professora auxiliar da Universidade de Aveiro





## agradecimentos

À Professora Doutora Maria Elisabete Jorge Vieira da Costa, orientadora deste relatório de estágio, pela sua disponibilidade, partilha de conhecimento e por todo o apoio, rigor e incentivo ao longo deste trabalho.

Ao Professor Doutor José Martinho Marques de Oliveira, pela partilha de conhecimentos e receptividade.

À empresa *Moldoeste II*, em especial ao Engenheiro Cláudio Domingues, Doutor Filipe Teixeira, Doutora Ana Vieira, Engenheira Sílvia Pereira, Sofia Coutinho, Lucinda Ferreira, Jéssia Vieira, Isa Marques, David Amaro e Cláudio Silva pela ajuda, disponibilidade e apoio para a realização deste relatório de estágio.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro, pela ajuda na realização de ensaios experimentais e pela partilha de conhecimentos, dos quais destaco a Engenheira Ana, Engenheira Marta, Sr. Miguel e Sr. Óctávio.

À Liliana, Daniel e Hélder que são docentes e não docentes da Escola Superior Aveiro Norte da Universidade de Aveiro, pela sua grande ajuda na concretização de ensaios experimentais.

Aos colegas e amigos Cátia Ferreira, Olívia Gonçalves, Catarina Ferreira, Joana Fernandes, Carina Costa e Mónica Silva pelo apoio, motivação, interajuda e amizade.

À minha família, por todo o apoio, motivação e compreensão.

Aos meus amigos Inês Vieira, Carla Mendes, Carolina Vieira, Frederico Sousa, Pedro Vieira, Dário Oliveira, Cátia Ferreira, Nuno Alexandre, Filipe Vieira, Paulo Antunes, Pedro Gentil, João Tarana, Sónia Pinhal, Sérgio Ventura, Bárbara Ferreira, João Silva, Marisa Silva, Edgar Silva, Renata Gaspar, Saul Vitorino e Diogo Correia pelo incentivo e força dados em alturas menos boas e pelos momentos de alegria e diversão que partilhamos juntos.

E, em especial, ao Professor Doutor Mário Correia, ao Engenheiro Carlos Dias e à Professora Inês Carreira pela grande ajuda e partilha de conhecimentos.



## **palavras-chave**

Rolamentos da suspensão, Polímeros de alto desempenho, Poliamida, Fibras de Vidro, Poliacetal, Resistência mecânica e Rugosidade superficial

## **resumo**

Atualmente, a utilização e as diversas aplicações de materiais poliméricos seguem tendências crescentes, pelo que se torna necessário aprofundar a compreensão do seu comportamento e funcionalidades.

Neste contexto, na presente dissertação analisa-se a fabricação e características de rolamentos poliméricos para a suspensão automóvel. Estes rolamentos visam a substituição dos clássicos rolamentos metálicos. Esta substituição tem por objetivos garantir a melhoria do funcionamento dos rolamentos, bem como o seu usufruto, contribuindo para um maior conforto e segurança dos passageiros e para uma redução do peso do veículo, com consequente diminuição do consumo do combustível e melhoria da eficiência.

Sendo o poliacetal (POM) e a poliamida (PA) considerados polímeros de alto desempenho, estes polímeros reúnem boas características para aplicação na fabricação de dispositivos com funcionalidades exigentes como é o caso dos rolamentos. O presente trabalho aborda o estudo de algumas das suas propriedades, de modo a obter informações relevantes quanto à respetiva aplicação em rolamentos de suspensão, tendo como foco principal a análise da matéria-prima utilizada. Deste modo, alteraram-se as formulações variando-se os teores de material virgem e reciclado, estudou-se o seu comportamento mecânico, reológico e térmico: fizeram-se análises reológicas através do estudo do MFI a fim de se obterem informações complementares ao estudo mecânico, realizaram-se análises térmicas para avaliar a possibilidade de degradação térmica do material e, no caso da PA66-30GF, recorreu-se à microscopia eletrónica de varrimento para se estudar os aspetos microestruturais deste compósito reforçado com fibra de vidro.

Adicionalmente, procedeu-se à análise da rugosidade superficial dos componentes dos rolamentos e quantificou-se o torque dos mesmos.

A partir dos estudos anteriores, foi possível concluir que o POM apresenta um comportamento mecânico estável mesmo utilizando uma formulação com 100% de material reciclado. Este comportamento não se verificou na PA66-30GF, dado que as suas propriedades mecânicas são afetadas de forma significativa pelo teor de reciclado na formulação.

Com o estudo do torque determinou-se o valor limite do momento de torsão do rolamento que garante o seu bom funcionamento e eficácia.



**keywords**

Suspensions bearings, High performance polymers, Polyamide, Glass fiber, Polyacetal, Mechanical Strength and Surface roughness.

**abstract**

Currently, the use and the diverse applications of polymeric materials are showing growing trends, and so it is necessary to look more closely to their behavior and functionalities.

In this context, in this thesis we analyze the manufacture and characteristics of polymeric bearings for the automobile suspension, aiming to replace the traditional metal bearings. This replacement will ensure the improved functioning of bearings as well as their use, concurring to greater comfort and safety of passengers while reducing the vehicle weight, thus decreasing fuel consumption and improving efficiency.

As the polyacetal (POM) and the polyamide (PA) are considered high performance polymers, they aggregate good characteristics for use in the production of devices with demanding features such as bearings. This study addresses some of its properties, in order to obtain relevant information about the application of the referred polymers in suspension bearings, focusing mainly on the analysis of the used raw material.

Thus, different polymer formulations with various ratios of virgin and recycled polymers were characterized in terms of mechanical, rheological and thermal behavior: mechanical behavior was studied changing the formulations of virgin and recycled materials; rheological analyzes were made through the MFI studies in order to obtain complementary information to the mechanical study, thermal analysis were conducted to evaluate the possibility of thermal degradation of the material and, in the case of PA66-30GF, scanning electronic microscopy was used to access the microstructure of the composite reinforced with glass fiber.

In addition, the surface roughness of the bearing components was analysed and torque was quantified.

The obtained results allowed to conclude that POM presents a stable mechanical behavior regardless the percentage of recycled material in the composition. Regarding PA66-30GF, this composite showed a different behavior as its mechanical properties are clearly affected by the amount of recycled material used in the composition.

The study of the moment of torsion allowed to determine the limit value that ensures a proper functioning and efficiency of the bearing.



# Índice

<b>Capítulo 1 – Introdução e objetivos.....</b>	<b>1</b>
1.1    O Grupo Moldoeste .....	2
1.2    Introdução e objetivos .....	4
<b>Capítulo 2 – Revisão da Literatura .....</b>	<b>3</b>
2.1    Rolamentos .....	8
2.1.1    Nota Histórica .....	8
2.1.2    Aplicação dos rolamentos nos automóveis .....	8
2.1.3    Principais constrangimentos dos rolamentos metálicos .....	10
2.2    Polímeros de elevado desempenho.....	12
2.2.1    Polióxido de metileno .....	14
2.2.2    Politetrafluoretileno .....	15
2.2.3    Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMWPE).....	16
2.2.4    Poliamidas.....	17
2.2.5    Aditivos .....	19
2.2.6    Fases de reforço.....	20
2.3    Processo de injeção.....	23
2.3.1    Ciclo de moldação.....	24
2.3.2    Variáveis de controlo no processo de injeção .....	25
<b>Capítulo 3 – Formulação do Problema.....</b>	<b>29</b>
<b>Capítulo 4 – Procedimento Experimental.....</b>	<b>33</b>
4.1    Matéria-prima .....	34
4.1.1    POM .....	34
4.1.2    PA66-30GF .....	36
4.1.3    UHMWPE .....	37
4.2    Técnicas Experimentais de Caracterização .....	38
4.2.1    Análise reológica – Índice de Fluidéz (MFI) .....	38
4.2.2    Análise térmica - Curvas de Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC) .....	41
4.2.3    Rugosidade superficial .....	45
4.2.4    Análise Microestrutural - Microscópio Eletrónico de Varrimento - MEV (SEM/EDS) .....	47
4.2.5    Análise Mecânica .....	48

4.2.5.1	Ensaio de Tração .....	48
4.2.5.2	Momento de torção ou Torque .....	52
<b>Capítulo 5 – Resultados .....</b>		<b>55</b>
5.1	POM .....	56
5.1.1	Características mecânicas do elemento do rolamento em POM .....	56
5.1.2	Comportamento reológico do POM .....	60
5.1.3	Comportamento térmico do POM .....	60
5.2	PA66-30GF .....	62
5.2.1	Comportamento mecânico do elemento do rolamento com PA66-30GF .....	62
5.2.2	Comportamento reológico PA66-30GF .....	63
5.2.3	Comportamento térmico da PA66-30GF .....	64
5.2.4	Análise microestrutural da PA66-30GF .....	65
5.3	Comportamento do rolamento polimérico .....	67
<b>Capítulo 6 – Discussão de Resultados .....</b>		<b>71</b>
6.1	Comportamento mecânico, reológico e térmico do POM .....	72
6.2	Análise do comportamento mecânico, reológico, térmico e microestrutural da PA66-30GF .....	73
6.3	Comportamento mecânico do rolamento polimérico .....	76
6.3.1	Análise da rugosidade superficial .....	76
6.3.2	Momento de Força ou Torque .....	77
<b>Capítulo 7 – Conclusões e trabalhos futuros .....</b>		<b>79</b>
<b>Referências bibliográficas .....</b>		<b>82</b>
<b>Anexos .....</b>		<b>87</b>
Anexo I – Organograma da Moldoeste II .....		88
Anexo II – MFI .....		89
Anexo III – Relatório de ensaio do POM .....		90
Anexo IV – Relatório de ensaio da PA66-30GF .....		91
Anexo V – Ensaio de tração .....		92
Anexo VI – Momento de torção dos rolamentos poliméricos .....		97



## Índice de figuras

Figura 1 – Logótipo Grupo Moldoeste <sup>1</sup> .....	2
Figura 2 – Molde de pequena ou média dimensão <sup>1</sup> .....	3
Figura 3 – Molde de grande dimensão <sup>1</sup> .....	3
Figura 4 – Empresa Moldoeste II – Indústria de Plásticos. ....	4
Figura 5 – Ilustração das várias componentes da suspensão do automóvel <sup>11</sup> . ....	9
Figura 6 – Esquematização da suspensão automóvel <sup>12</sup> . ....	10
Figura 7 – Modelo de um rolamento de suspensão metálico. Legenda: A – esferas; B – bandas protetoras das esferas; C – vedante para evitar possíveis contaminações nas esferas <sup>13</sup> .....	10
Figura 8 – Rolamentos poliméricos para a suspensão automóvel <sup>18</sup> . ....	13
Figura 9 – Estrutura molecular do poliacetal .....	14
Figura 10 – Estrutura molecular do politetrafluoretileno .....	15
Figura 11 – Estrutura molecular do polietileno .....	16
Figura 12 – Estrutura molecular da PA 6.....	17
Figura 13 – Estrutura molecular da PA 66.....	17
Figura 14 – Estrutura molecular do 3-aminopropiltrietoxisilano (APTES) <sup>42</sup> .....	22
Figura 15 – Esquematização da interface entre o polímero e a fibra de vidro <sup>42</sup> .....	22
Figura 16 – Esquematização do processo de injeção de plásticos <sup>48</sup> . ....	24
Figura 17 – Sequência de passos que constituem o ciclo de moldção <sup>35</sup> .....	25
Figura 18 – Elementos constituintes do rolamento polimérico produzido pela <i>Moldoeste II</i> ....	31
Figura 19 – Elemento superior do rolamento polimérico produzido na <i>Moldoeste II</i> .....	34
Figura 20 – Variação do módulo de rigidez do <i>Ultraform N2320 0035</i> ® em função da temperatura .....	35
Figura 21 – Elemento inferior do rolamento polimérico produzido na <i>Moldoeste II</i> . ....	36
Figura 22 – Anel do rolamento polimérico produzido na <i>Moldoeste II</i> . ....	37
Figura 23 – Esquema representativo dos principais constituintes do plastómetro <sup>58</sup> .....	39
Figura 24 – Equipamento (MFI-9) utilizado para a determinação do MFI. Adaptado de <sup>59</sup> .....	39
Figura 25 – Zona do ensaio – aspetos dimensionais.....	40
Figura 26 – Cargas para a medição do MFI. ....	40
Figura 27 – Registo típico obtido num ensaio de calorimetria diferencial de varrimento com amostra polimérica <sup>60</sup> .....	42
Figura 28 – Curva obtida em ensaio DSC com amostra polimérica, durante o aquecimento (registo inferior) e durante o arrefecimento da mesma amostra (registo superior). No registo de aquecimento /(ou arrefecimento) pode ler-se a temperatura de fusão ( $T_{\text{fusão}}$ ) /(ou de	

cristalização) do polímero e determinar-se a variação de entalpia associada à sua fusão ( $\Delta H$ de fusão) / (ou $\Delta H$ de cristalização) <sup>61</sup> .....	42
Figura 29 – Topo do forno do calorímetro diferencial de varrimento com dois cadinhos sobre suportes de platina <sup>62</sup> .....	43
Figura 30 – Ilustração do cálculo das entalpias de cristalização e de fusão a partir do traçado da curva de DSC do polímero <sup>63</sup> . Exemplo: entalpia de fusão [J/g] = $\Delta H_{fusão}$ =área tracejada/massa da amostra .....	44
Figura 31 – Rugosidade média expressa graficamente <sup>66</sup> . .....	45
Figura 32 – Determinação de Rz com média das rugosidades mais profundas <sup>66</sup> . .....	46
Figura 33 – Perfilómetro Mahr, série M1 <sup>67</sup> . .....	47
Figura 34 – Microscópico Hitachi SU-70.....	48
Figura 35 – Provetes produzidos na <i>Moldoeste II</i> . .....	49
Figura 36 – Gráfico tensão-extensão do POM. ....	51
Figura 37 – Gráfico tensão extensão da PA66-30GF. ....	51
Figura 38 – Screw-cap Tester, modelo DTX2-10N-A <sup>68</sup> .....	53
Figura 39 – Fixação do rolamento no ensaio para determinação de torque.....	53
Figura 40 – Exemplos do tipo de imperfeição superficial detetada no elemento superior.....	56
Figura 41 – Injeção submarina <sup>69</sup> .....	57
Figura 42 – a) exemplo do tipo de imperfeição superficial detetada no elemento superior; b) exemplo da nova produção dos elementos superiores com as novas alterações e isenta de imperfeições.....	58
Figura 43 – Variação da tensão máxima registada em ensaios de tração-deformação com amostras de POM adicionadas com diferentes teores de reciclado. A tensão máxima mantém-se na gama de valores 50 a 52 MPa quando o teor de reciclado varia entre 0 e 100%. ....	59
Figura 44 – Variação da tensão máxima registada em ensaios de tração-deformação com amostras de POM adicionadas com diferentes teores de aditivo. A variação do teor de aditivo afeta a tensão máxima, observando-se a sua diminuição com o aumento da quantidade de aditivo.....	59
Figura 45 – Variação do MFI com o aumento do teor de reciclado de formulações no POM....	60
Figura 46 – Curvas DSC do POM 100% reciclado e 100% virgem, sujeitos a taxas de aquecimento e arrefecimento de 10°C/ min.....	61
Figura 47 – Variação da tensão máxima registada em ensaios de tração-deformação com amostras de PA66-30GF adicionadas com diferentes teores de reciclado. A tensão máxima tende a aumentar quando o teor de reciclado varia entre 0 e 100%. ....	62

Figura 48 – Variação do MFI com o aumento do teor de reciclado de formulações na PA66-30GF. .....	63
Figura 49 – Curvas DSC da PA66-30GF 100% reciclado e 100% virgem, sujeita a uma taxa de aquecimento e arrefecimento de 10°C/ min. ....	64
Figura 50 – Micrografia obtida através do ensaio de SEM relativamente à amostra 100% virgem com uma ampliação de 200 µm. ....	65
Figura 51 – Micrografia obtida através do ensaio de SEM relativamente à amostra 100% virgem com uma ampliação de 20 µm. ....	66
Figura 52 – Micrografia obtida através do ensaio de SEM relativamente à amostra 100% reciclada com uma ampliação de 200 µm. ....	66
Figura 53 – Micrografia obtida através do ensaio de SEM relativamente à amostra 100% reciclada com uma ampliação de 20 µm. ....	67
Figura 54 – Determinação do torque em rolamentos considerados dentro de especificações (“go”). ....	68
Figura 55 – Determinação do torque em rolamentos considerados no limite das especificações (“go” ou “no-go”). ....	68
Figura 56 – Determinação do torque em rolamentos considerados fora de especificações (“no-go”). ....	69
Figura 57 – Micrografia obtida através do ensaio de SEM relativamente à superfície do compósito 100% virgem numa ampliação de 20 µm. ....	76
Figura 58 – Micrografia obtida através do ensaio de SEM relativamente à superfície do compósito 100% reciclado numa ampliação de 20 µm. ....	76

## Índice de tabelas

Tabela I – Propriedades físicas de polímeros técnicos <sup>19, 22</sup> .....	13
Tabela II – Propriedades típicas do POM <sup>22</sup> .....	14
Tabela III – Propriedades características do PTFE <sup>22</sup> .....	15
Tabela IV – Comparação das propriedades de diversos polietilenos <sup>26, 31</sup> .....	16
Tabela V – Propriedades gerais das poliamidas do tipo 6 e 66 <sup>26, 32</sup> .....	18
Tabela VI – Propriedades da Poliamida do tipo 66 com e sem reforço em fibra de vidro <sup>34</sup> .....	18
Tabela VII – Propriedades das fibras de carbono, de vidro e de aramida usadas como fase de reforço <sup>40</sup> .....	21
Tabela VIII – Efeitos da alteração das principais variáveis no processo de injeção de plásticos <sup>53, 50, 54</sup> .....	27
Tabela IX – Composição da matéria-prima usada na fabricação dos constituintes do rolamento produzido pela Moldoeste .....	30
Tabela X – Lista de tarefas a executar no presente trabalho.....	32
Tabela XI – Propriedades e condições de injeção do Ultrafom N2320 0035 <sup>®23, 24</sup> .....	35
Tabela XII – Propriedades e condições de injeção da <i>Ultramid A3EG6</i> <sup>®</sup> (PA66-30GF) <sup>47, 56</sup> .....	36
Tabela XIII – Propriedades e condições do Polietileno de Ultra Elevado Peso Molecular (UHMWPE) <sup>57</sup> .....	38
Tabela XIV – Condições do ensaio de determinação do MFI das matérias-primas utilizadas. ....	41
Tabela XV – Condições do ensaio das curvas DSC para as matérias-primas utilizadas.....	43
Tabela XVI – Condições pré-estabelecidas ao POM e à PA66-30GF para a realização de ensaios de tração. ....	49
Tabela XVII – Valores médios da rugosidade superficial (Ra) .....	56
Tabela XVIII – Comparação dos valores de rugosidade média (Ra) medidos antes e depois das alterações impostas ao molde e ao processo de injeção.....	57
Tabela XIX – Valores de temperaturas e de entalpia de fusão (Tf (°C) e ΔHf (J/g), respetivamente) e de temperaturas e de entalpia de cristalização (Tc (°C) e ΔHc (J/g), respetivamente), bem como graus de cristalinidade (X <sub>cf</sub> (%)) de formulações de POM virgem e reciclado – valores determinados com base nas curvas DSC apresentadas na Figura 46. ....	61
Tabela XX – Valores de temperaturas e de entalpia de fusão (Tf (°C) e ΔHf (J/g), respetivamente) e de temperaturas e de entalpia de cristalização (Tc (°C) e ΔHc (J/g), respetivamente), bem como graus de cristalinidade (X <sub>cf</sub> (%)) de formulações de PA66-30GF virgem e reciclado – valores determinados com base nas curvas DSC apresentadas na Figura 49. ....	65

## **Lista de abreviaturas**

**ABS** – Acrilonitrilo Butadieno Estireno

**DSC** – Calorimetria Diferencial de Varrimento

**HDPE** – Polietileno de Alta Densidade

**LDPE** – Polietileno de Baixa Densidade

**LLDPE** - Polietileno Linear de Baixa Densidade

**MFI ou IF** (em português) – Índice de Fluidez

**PA** – Poliamida

**PA 6** – Poliamida do tipo 6

**PA 66** – Poliamida do tipo 66

**PA66-30GF** – Poliamida do tipo 66 com 30% de fibra de vidro

**PBT** – Tereftalato de Polibutileno

**PE** – Polietileno

**PET** – Polietileno Tereftalato ou poliéster

**PP** – Polipropileno

**PPO** – óxido de polifenileno

**PPS** – Sulfeto de polifenileno

**POM** – Polióxido de metileno (Poliacetal)

**PSU** - Polissulfona

**PTFE** – Politetrafluoretileno

**PVC** – Policloreto de vinilo

**SEM ou MEV** (em Português) – Microscópio Eletrónico de Varrimento

**UHMWPE** – Polietileno de Ultra Elevado Peso Molecular



## Capítulo 1

### Introdução e objetivos

## 1.1 O Grupo Moldoeste

O Grupo Moldoeste (conhecido pelo logótipo lustrado na Figura 1), sediado no concelho de Leiria, liderado por Valdemiro Teixeira, tem como principal campo de atuação o desenvolvimento e produção de moldes de injeção de plásticos, empregando cerca de 100 trabalhadores. Surgiu em 1988 na cidade da Marinha Grande com o objetivo de produzir moldes exclusivamente para clientes locais. No mesmo ano, obteve resultados bastante positivos que permitiram os primeiros negócios de exportação. Mais tarde, e com intuito de oferecer uma maior variedade de produtos, acessibilidade e confidencialidade aos seus clientes, foram criadas mais duas empresas no grupo<sup>1</sup>.



Figura 1 – Logótipo Grupo Moldoeste<sup>1</sup>.

Atualmente o Grupo Moldoeste é constituído por três empresas, duas das quais dedicadas à produção de moldes e uma terceira especializada exclusivamente na injeção de termoplásticos. As duas primeiras, sediadas na Marinha Grande, estão delimitadas pela capacidade dos moldes que produzem, ou seja, uma empresa destina-se a moldes de pequena e média dimensão (Figura 2), com capacidade até 6 toneladas e a outra aos de média e grande dimensão (Figura 3), até 20 toneladas de capacidade. No entanto, o Grupo pretende alargar a capacidade num futuro próximo até a um limite máximo de 30 toneladas.

De modo a satisfazer as exigências dos clientes, o *Grupo Moldoeste* fornece serviços e equipamentos de alta performance tais como:

- Moldes protótipos;
- Moldes para Bi-injeção, injeção a gás, sanduíche e sobremoldação;
- Tecnologias variadas (injeção vertical de baixa pressão, injeção de cunha, entre outros);
- Equipamentos capazes de testar os moldes e as produções, como por exemplo gabaris de controlo e *softwares* de elevada especialização na indústria dos moldes<sup>1</sup>.





**Figura 2 – Molde de pequena ou média dimensão<sup>1</sup>.**



**Figura 3 – Molde de grande dimensão<sup>1</sup>.**

O Grupo Moldoeste exporta cerca de 95% da sua produção para países como Alemanha (aproximadamente 70% da exportação), Bélgica, Bielorrússia, Brasil, Espanha, EUA, França, Holanda, Israel, México, Rússia, Suécia, Suíça, Ucrânia, entre outros e, apenas 5% para território nacional. Segundo dados estatísticos referentes ao ano 2013, as principais indústrias beneficiárias dos produtos injetados no *Grupo Moldoeste* são indústrias do sector automóvel (BMW, Honda, Peugeot, Opel, Mini, Mercedes, Skoda, Renault, Citroen, etc) relativamente a 85% da produção, destinando-se os restantes 15% à produção de eletrodomésticos, artigos eletrónicos e para telecomunicações, indústria de sanitários, indústria médico-farmacêutica, produtos industriais, entre outros.

A Moldoeste II (Figura 4) foi fundada em 2002 em Regueira de Pontes (Leiria) com o objetivo de produzir, por injeção, componentes plásticos destinados maioritariamente ao setor automóvel, usando moldes fabricados pelas outras empresas do grupo. Esta empresa tornou-se um parceiro valioso para as restantes empresas do grupo, executando grande parte dos testes e otimizações dos moldes. A sua formação como empresa permitiu aos clientes ter o seu negócio mais localizado, produzindo os moldes nas empresas de moldes e os componentes finais nesta empresa que é conhecida por Moldoeste Plásticos. Ao nível da moldação por injeção, injeta componentes até 1,5 kg, seguindo as especificações e/ ou exigências dos seus clientes. Possui 13 máquina de injeção que funcionam 24 horas diárias em 5 dias por semana, mas devido a uma sobrecarga de encomendas, passou recentemente a trabalhar 24 horas por dia e 7 dias por semana. Para além da injeção, assegura alguns equipamentos capazes de executar operações de acabamento e manutenção, tais como, balanças, rebarbadoras, paquímetros, equipamento de medição do teor de humidade da matéria-prima, equipamento de óptica e apalpação, entre outros.



Por fim, é de referir que a empresa está certificada pela ISO 9001:2008 (Sistemas de Gestão da Qualidade) e pela ISO TS 16949 (Sistema de Gestão da Qualidade no Sector Automóvel).



Figura 4 – Empresa Moldoeste II – Indústria de Plásticos.

## 1.2 Introdução e objetivos

Os rolamentos surgiram há milhares de anos na época dos egípcios quando foi necessário criar um objeto capaz de auxiliar o transporte dos blocos de pedra para a construção das pirâmides. Estes são um componente de apoio ao funcionamento de determinado tipo de equipamentos ou à manutenção dos mesmos, tendo como objetivo facilitar o movimento de superfícies dificultado pelo atrito<sup>2</sup>.

A utilização do rolamento é comum no nosso quotidiano e pode ser identificada em, eletrodomésticos (aparelhos de ar-condicionado e aspiradores, por exemplo), fotocopiadoras, computadores, satélites, máquinas de conformação, instrumentos de precisão, instrumentos agrícolas, instrumentos para a construção civil, e nos meios de transporte (carros, comboios, aviões, bicicletas, etc) entre muitos outros<sup>3,4,5</sup>.

A modernização tecnológica permitiu uma grande evolução dos meios de transporte, tendo-se criado novos meios ou aperfeiçoado significativamente os já existentes. Atualmente é possível classificar os meios de transporte em três categorias; (i) transportes aéreos (aviões e helicópteros); (ii) transportes marítimos (navios); (iii) e transportes terrestres que por sua vez



estão divididos em transportes ferroviários (comboio e locomotiva) e transportes rodoviários (autocarros, motas, camiões e automóveis).

Neste trabalho, dá-se particular ênfase à aplicação do rolamento no setor automóvel. O primeiro automóvel foi criado em 1886 por *Karl Benz* na Alemanha. Era um automóvel constituído por três pneus (pneus de bicicleta), um motor, um chassi feito de madeira, uma manivela que servia de volante e um banco. A sua velocidade máxima era de 8 quilómetros por hora (km/h) e movimentava-se a gasolina<sup>6</sup>.

O automóvel dos dias de hoje é constituído essencialmente por um motor, embraiagem, transmissão, direção, suspensão e chassis, travões, sistema elétrico, rodas e carroçaria. A velocidade correspondente a um automóvel deste tipo varia consoante a gama a que pertence, podendo atingir facilmente os 200 km/h<sup>7</sup>.

Para responder às exigências do automobilista moderno é necessário que o automóvel conjugue elevada dinâmica e potência. Em paralelo existem outros requisitos a que um bom produto tem de responder, tais como, segurança, conforto, baixos consumos e eficiência. Para satisfazer este rol de exigências, a indústria investe com afinco no desenvolvimento de novos motores, transmissões, chassis e dispositivos acessórios (rolamentos, cubos de roda, sistema ABS, sensores de estacionamento, *air bag*, entre outros)<sup>8</sup>.

A presente dissertação foca-se no rolamento de carga axial, como dispositivo de interesse. O tipo de material de que é constituído o rolamento impõe diversas condicionantes ao seu funcionamento. No sentido de contornar algumas dessas limitações, o grupo Moldoeste II está a investir na produção de rolamentos de base polimérica que visam ultrapassar alguns dos problemas associados aos tradicionais rolamentos metálicos e a melhorar o desempenho deste tipo de dispositivo.

Assim, o presente trabalho tem como objetivos principais a identificação e estudo de parâmetros (características da composição polimérica e determinadas variáveis processuais) responsáveis pela não conformidade de algumas características do produto final, designadamente propriedades mecânicas e de superfície, face aos valores esperados e, por conseguinte, pelo deficiente desempenho do produto.

Na empresa Moldoeste II, os polímeros utilizados para a produção de rolamentos poliméricos são o polióxido de metileno (POM), poliamida do tipo 66 (PA66) com 30% de fibra de vidro e o polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMWPE).



## Capítulo 2

# Revisão da Literatura



## 2.1 Rolamentos

### 2.1.1 *Nota Histórica*

Embora os rolamentos já fossem conhecidos na antiguidade egípcia, época em que a necessidade de movimentar os pesados blocos de pedra destinados à construção das pirâmides levou à utilização de troncos de árvores para facilitar o transporte dos mesmos, foram os contributos de Leonardo DaVinci, Galileo, John Harrison, Philip Vaughn, Friedrich Fischer, Henry Timken, Sven Wingquist e Georg Schaeffler que verdadeiramente influenciaram a evolução dos rolamentos<sup>9</sup>. Por exemplo, foi no século XV que Leonardo DaVinci inventou o princípio do rolamento, observando que, quando as esferas que integram o rolamento não estabelecem contacto, o atrito é significativamente reduzido. Até essa data os rolamentos eram fabricados com madeira, osso, pedra ou couro. Mais tarde, é a partir do século XVIII, com a revolução industrial, a evolução dos rolamentos sofre então um impulso<sup>9</sup>. No início da década de 90 e até à atualidade, o rolamento revelou-se um componente de vital importância para o desenvolvimento de produtos novos como eletrodomésticos, material informático, etc. A atual estratégia de desenvolvimento do rolamento tem como metas principais a redução do seu peso, o prolongamento do seu tempo de vida útil, o aumento da sua eficácia e a diminuição do consumo energético do veículo a que se destina.

### 2.1.2 *Aplicação dos rolamentos nos automóveis*

Para responder às exigências de mercado, a evolução do automóvel terá de salvaguardar a satisfação de critérios de rigidez e de bom funcionamento, e sempre com o menor custo possível. Assim todos os componentes presentes no automóvel devem idealmente apresentar maior rigidez, maior durabilidade, menor desgaste, baixo custo e melhor eficiência<sup>4</sup>.

Os rolamentos metálicos apresentam diversas vantagens tais como uma boa relação entre peso e a eficiência, o preço e a sua durabilidade. Em contrapartida, têm dois inconvenientes consideráveis: a necessidade de lubrificação e a contaminação a que estão sujeitos durante o seu funcionamento.

No caso particular dos automóveis, os rolamentos são usados no cubo de roda, no sistema de direção, no motor e acessórios elétricos, na transmissão e na suspensão<sup>10</sup>.

A suspensão é um sistema que desempenha um papel muito importante graças à sua capacidade de ajustar o movimento do carro, assegurando a estabilidade do veículo durante o



seu percurso e contribuindo para a segurança do mesmo. A suspensão sofre cerca de 3 a 8kN de carga axial e é composta por diversos elementos., como se ilustra na Figura 5<sup>11</sup>.

O rolamento é uma peça crucial do sistema de suspensão devido à sua capacidade de rodar e mudar o ângulo do suporte do amortecedor influenciando de forma positiva na direção do automóvel. Está geralmente localizado na extremidade da haste do amortecedor que interage diretamente com carroçaria do automóvel (Figura 6 e Figura 7).

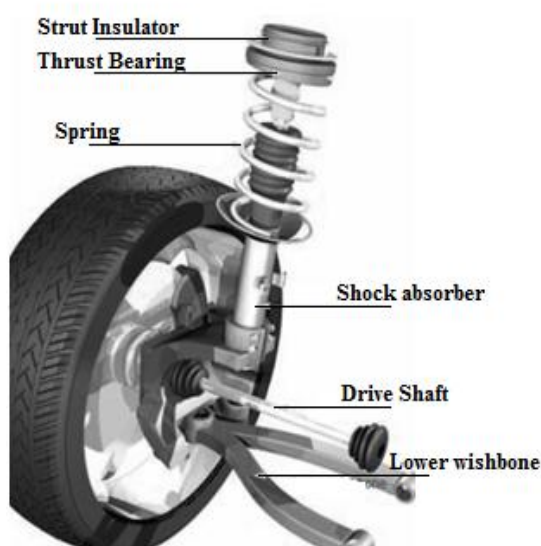


Figura 5 – Ilustração das várias componentes da suspensão do automóvel<sup>11</sup>.

A substituição do rolamento deve ser feita de imediato quando há sinais de desgaste (devido, por exemplo, a impactos mecânicos), quando falha num acidente, quando em caso de problemas na direção do veículo, de folga no eixo e quando existe o *falso efeito Brinell*<sup>a</sup>. <sup>11</sup>

---

<sup>a</sup> É caracterizado pelo desgaste do material durante um determinado período de tempo sujeito a vibração e com uma oscilação de baixa amplitude ou em estado estático. Quando ocorre este efeito o lubrificante falha colocando as duas superfícies do rolamento em contacto.

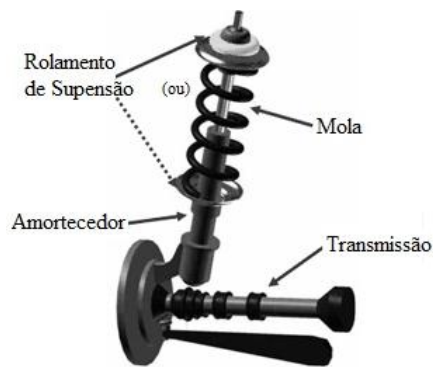


Figura 6 – Esquemática da suspensão automóvel<sup>12</sup>.

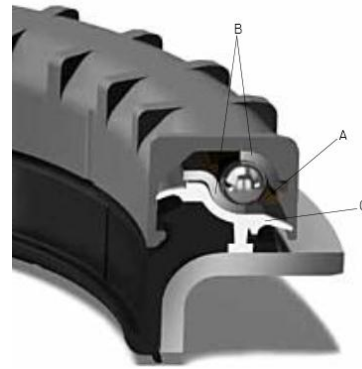


Figura 7 – Modelo de um rolamento de suspensão metálico. Legenda: A – esferas; B – bandas protetoras das esferas; C – vedante para evitar possíveis contaminações nas esferas<sup>13</sup>.

### 2.1.3 Principais constrangimentos dos rolamentos metálicos

Os rolamentos metálicos em funcionamento podem sofrer avarias cujas causas podem ser: (i) **causas externas**, como por exemplo a falta de manutenção, o défice de lubrificação, as altas temperaturas a que estão sujeitos, a velocidade de rotação, a presença de impurezas contaminadoras do lubrificante, entre outras; (ii) **causas humanas**, que dizem respeito a uma má escolha do tipo de rolamento ou à qualidade do mesmo não ser a mais adequada para a função; (iii) **causas materiais**, que implicam o tipo de material com que é feito o rolamento, e que podem originar deformações, fissuras, má qualidade, ou até mesmo um mau funcionamento do rolamento; e (iv) **outras causas** que se manifestam ao longo do tempo, como por exemplo, uma má montagem que provoca uma avaria a longo prazo, uma ferramenta inadequada durante a montagem, entre outros<sup>14</sup>.

Entre estes diversos tipos de avarias/falhas nos rolamentos é a causa externa a que responde por 90% das incidências. Segundo a *SNR*<sup>®</sup>, as causas externas são as principais responsáveis por problemas como descamações, gripagem, vibrações, desgaste, crateras e estrias, fissuras e deterioração das gaiolas.

A escamação, que afeta igualmente corpos rolantes e anéis, deve-se à repetibilidade de movimentos entre os anéis e os corpos rolantes que provocam inicialmente fissuras no material e que têm a tendência de propagar-se quando não são detetados. Após a ocorrência de fissuras e sua posterior propagação o material é arrancado em pedaços irregulares que danificam de imediato o rolamento, inutilizando-o. Após o surgimento da escamação, se esta não for detetada atempadamente, evolui para uma escamação avançada em que as fissuras se vão unindo,





provocando um dano superficial de grandes dimensões. Os fragmentos de material que se vão soltando passam para o lubrificante, tornando-se impurezas que aceleram a destruição do rolamento. A escamação passa então à fase final, denominada de escamação final, em que a superfície em causa está praticamente toda afetada, destruindo por completo a peça e inibindo, também por completo o funcionamento do rolamento.

A gripagem é simplesmente o efeito de fricção produzido entre duas superfícies metálicas, em contacto uma com a outra, que aderem devido à ausência de lubrificante ou à má escolha do mesmo.

As vibrações são detetadas pelo chamado *falso efeito de Brinell*. Como já foi exposto anteriormente, este efeito é descrito como sendo o desgaste do material, ao fim de um determinado tempo, em que este é exposto à vibração e está sujeito a cargas num estado estático ou com baixa oscilação. Enquanto ocorre este efeito, o lubrificante, devido às vibrações e à oscilação, é afastado colocando as superfícies do material em contacto uma com a outra. Com o aumento de peso ou das vibrações, o risco de ocorrência deste efeito é muito maior.

O desgaste no rolamento resulta essencialmente do elevado número de rotações a que os corpos rolantes estão sujeitos sobre os anéis. Com o tempo, e consoante as condições a que o rolamento está exposto, este pode estar sujeito a impurezas, tais como a entrada de partículas para o meio do lubrificante, que ao alojarem-se entre os corpos rolantes e os anéis, causam desgaste nos anéis, acelerando a fadiga dos mesmos. Para evitar este problema é conveniente ter cuidados redobrados de limpeza antes da instalação do rolamento, verificar o estado da gaiola, caso seja um rolamento de esferas e ter em conta o tipo de lubrificante.

As crateras e estrias são falhas visíveis muitas vezes a olho nu e que são caracterizadas por picadas ou por “fendas” nos anéis ou também nos rolos (um dos tipos de corpo rolante). Estes tipos de problemas só acontecem quando o rolamento é o único elemento de ligação entre a massa e o solo, sendo visíveis estes problemas em máquinas giratórias.

As fissuras aparecem em diversos locais, como superfícies planas, curvas e até mesmo nos corpos rolantes. Estas acontecem quando se excede o limite de elasticidade do material, formando uma marca permanente.

Por fim, a deterioração das gaiolas é causada por uma incorreta utilização de ferramentas que causa deformações aquando da montagem, ou quando durante o seu tempo de funcionamento, sofram um grande desgaste que acabam por levar à rutura<sup>14</sup>.



## 2.2 Polímeros de elevado desempenho

Até à data, para aplicações de carga elevada, os rolamentos têm sido maioritariamente fabricados com metais, embora, por vezes, incluam componentes poliméricos. Os rolamentos com esferas poliméricas têm sido utilizados fundamentalmente em situações de carga reduzida<sup>15</sup>. No entanto, e devido a diversas vantagens tribológicas que os polímeros oferecem, os rolamentos de base polimérica têm sido amplamente investigados e testados por investigadores com o objetivo de melhorar a eficiência dos mesmos.

Os polímeros adequados para a substituição do metal são normalmente polímeros de natureza termoplástica. Os termoplásticos são polímeros capazes de serem processados e moldados sob geometrias complexas. Dentro desta categoria de polímeros existem polímeros classificados por diversos autores como polímeros de elevado desempenho ou polímeros de engenharia que se diferenciam dos polímeros de grande consumo pelo facto de apresentarem propriedades superiores nomeadamente mecânicas, possuindo a capacidade de aguentar cargas por longos tempos. Estes polímeros têm por isso a capacidade de substituir nalgumas aplicações e de uma forma concorrencial, os metais, como por exemplo o alumínio.

São classificados como polímeros termoplásticos de engenharia as poliamidas (PA), o polióxido de metileno (POM), o tereftalato de etileno (PET), o polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMWPE) e tereftalato de polibutileno (PBT), o óxido de polifenileno (PPO), a polissulfona (PSU) e o sulfureto de polifenileno (PPS)<sup>16</sup>.

Para aplicações em rolamentos (Figura 8), os polímeros oferecem vantagens face aos metais devido a algumas das suas propriedades: os polímeros não necessitam de lubrificantes, que estão na origem de uma das principais falhas dos rolamentos metálicos devido à contaminação, apresentam elevada resistência ao desgaste e à fadiga e baixo coeficiente de atrito. Para além destas características, são resistentes à corrosão e impurezas como areias e poeiras, são mais leves que os metais ferrosos (densidade inferior à do aço em cerca de 80%) e fáceis de processar, têm a capacidade de serem conformados segundo geometrias mais complexas, são mais silenciosos em condições de operação e com boa capacidade de amortecimento e de isolamento elétrico. Apresentam, no entanto, algumas limitações como sejam a instabilidade a altas temperaturas, a baixa resistência a cargas excessivas e menores velocidades de rotação do que as de um rolamento de aço<sup>15, 17</sup>.



**Figura 8 – Rolamentos poliméricos para a suspensão automóvel<sup>18</sup>.**

Os termoplásticos que apresentam propriedades mais adequadas para substituir o metal na tecnologia dos rolamentos são o polióxido metileno (POM), o politetrafluoretileno (PTFE) ou Teflon<sup>®</sup>, o polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMWPE) e a poliamida ou *Nylon* (PA) quer do tipo 6 (PA6) ou do tipo 66 (PA66)<sup>19,20,21</sup>.

**Tabela I – Propriedades físicas de polímeros técnicos<sup>19, 22</sup>.**

Polímeros	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Dureza (H <sub>132/60</sub> )	Temperatura de fusão (°C)	Coefficiente de atrito
POM	1,41	3,1	155	175	0,2 – 0,35
PTFE	2,15	0,6	24	327	0,05 – 0,10
UHMWPE	0,93	0,8	32	132	0,10 – 0,14
PA 6	1,10	2,68	120	220	0,22 – 0,26
PA 66	1,14	3,0	180	205	0,25 – 0,28

A Tabela I, onde se listam e se sumarizam algumas das propriedades mais relevantes dos polímeros atrás referidos, evidencia que:

- O PTFE e o UHMWPE são polímeros com baixo módulo de elasticidade; o PA 66 e o POM são polímeros com elevado módulo de elasticidade e o polímero PA6 apresenta valores intermédios para a mesma propriedade<sup>19</sup>. Esta propriedade é extremamente importante nos rolamentos porque concede um valor à rigidez em cada tipo de material, influenciando desde logo nas propriedades mecânicas.

Para os rolamentos funcionarem eficazmente é aconselhável ter materiais com um elevado módulo de elasticidade de modo a garantir a resistência mecânica do mesmo e desempenhar a sua função sem constrangimentos.



Já de seguida será abordado com maior detalhe os polímeros de interesse para a aplicação em análise.

### 2.2.1 Polióxido de metileno

O POM também conhecido como poliacetal por pertencer à família dos acetais, é um termoplástico com a estrutura molecular representada na Figura 9.

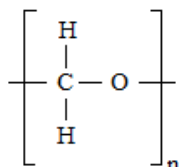


Figura 9 – Estrutura molecular do poliacetal

O POM, quando usado como substituto de metais e em relação aos restantes termoplásticos, apresenta como principais vantagens uma elevada estabilidade dimensional e um baixo coeficiente de atrito. Num segundo plano destaca-se, elevadas resistências química e térmica, boa resistência à flexão, à tração, à fratura e ao desgaste. É um polímero naturalmente branco opaco, inodoro, não tóxico e de elevada cristalinidade, o que o torna mais duro e resistente comparativamente a outros polímeros<sup>22, 23, 24, 25</sup>.

Como ponto fraco pode referir-se a sua suscetibilidade à degradação sob ação da radiação UV que provoca descoloração do polímero, diminuição da sua dureza e da sua resistência à tração. Esta degradação pode ser evitada através do uso de aditivos apropriados na formulação da composição polimérica. A Tabela II sumariza algumas das propriedades específicas deste polímero.

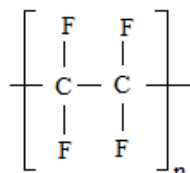
Tabela II – Propriedades típicas do POM<sup>22</sup>.

Densidade	1,41 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de fusão	175 °C
Resistência à tração	66 – 83 MPa
Módulo de elasticidade	26 – 30 GPa
Resistência à flexão	97 MPa



### 2.2.2 Politetrafluoretileno

O politetrafluoretileno, cuja fórmula comercial mais divulgada é o teflon<sup>®</sup> é um polímero com uma estrutura muito regular (Figura 10) e com elevado grau de cristalinidade (cerca de 95%)<sup>26</sup>.



**Figura 10 – Estrutura molecular do politetrafluoretileno**

O PTFE é regularmente usado em revestimentos antiaderentes de utensílios de cozinha, recipientes e tubos para produtos químicos corrosivos, como lubrificante e em instrumentos de medicina<sup>27</sup>.

O PTFE tem propriedades que podem ser muito interessantes para certas aplicações tais como uma elevada resistência química (é o mais resistente dos termoplásticos), elevada estabilidade a elevadas temperaturas e um baixíssimo coeficiente de atrito. Tem, no entanto, fraca resistência ao desgaste e à abrasão. A Tabela III sumariza algumas das propriedades mais relevantes do PTFE<sup>28</sup>.

**Tabela III – Propriedades características do PTFE<sup>22</sup>.**

Densidade	2,1 – 2,3 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de fusão	327 °C
Resistência à tração	20 MPa
Módulo de elasticidade	345 – 620 MPa
Coeficiente de atrito	0,05 – 0,10

O PTFE é frequentemente conjugado com o tereftalato de polietileno (PET), devido ao facto desta combinação de polímeros apresentar propriedades interessantes por associar o papel de lubrificante do PTFE à elevada resistência ao desgaste e à abrasão do PET, garantindo uma matéria-prima que estabilidade dimensional ao produto<sup>19</sup>.

### 2.2.3 Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMWPE)

O polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMWPE) pertence à família do polietileno (PE), embora seja um polímero de engenharia. O PE, que é um polímero de uso comum, apresenta a estrutura molecular esquematizada na Figura 11. Este termoplástico é obtido a partir da polimerização por adição do etileno, é um excelente isolador elétrico, resistente à corrosão, fácil de processar e de baixo custo. Entre os vários tipos de PE's (LDPE, LLDPE, HDPE e UHMWPE), o UHMWPE destaca-se pelo seu elevado peso molecular, excelentes propriedades, nomeadamente tribológicas e, também pelo seu difícil processamento.

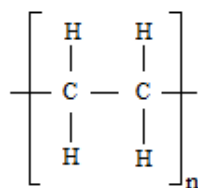


Figura 11 – Estrutura molecular do polietileno

Em relação aos restantes PE's e outros termoplásticos, o UHMWPE prima pela sua elevada resistência à abrasão, ao impacto e à corrosão e, também, pelo seu baixo coeficiente de atrito que faz dele também um excelente auto-lubrificante. No entanto, este tipo de material apresenta grandes dificuldades no seu processamento, sendo processado geralmente por sinterização<sup>29, 26</sup>. Devido às suas características, o UHMWPE tem sido amplamente usado na área médica, mais concretamente na fabricação de próteses articulares totais<sup>30</sup>. Para além disso é comum utiliza-lo em revestimentos de produtos para a indústria alimentar, para outros produtos na indústria médica e desporto<sup>29</sup>.

A Tabela IV permite fazer uma análise comparativa de algumas propriedades de membros da família do PE.

Tabela IV – Comparação das propriedades de diversos polietilenos<sup>26, 31</sup>.

	PE	LDPE	HDPE	UHMWPE
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,93 – 0,94	0,91 – 0,93	0,94 – 0,97	0,93 – 0,94
Temperatura de fusão (°C)	136	106 – 112	130 – 133	132
Resistência à tração (MPa)	4,14 – 15,86	8,27 – 24,13	21,37 – 37,92	27,58 – 1060
Resistência ao impacto (J/m)	26,50 – 870,98	-	26,50 – 3,02	-
Dureza (Shore D)	15	10	65	60 – 70



### 2.2.4 Poliamidas

As poliamidas (PA), cujo nome comercial mais divulgado é o *Nylon*, são termoplásticos semi-cristalinos, normalmente sintetizados a partir de um ou de dois monómeros<sup>26</sup>. As PA classificam-se em diversas famílias que são diferenciadas pelas suas características mecânicas, tais como a sua rigidez, módulo de elasticidade, entre outros<sup>16</sup>. As mais comuns são as do tipo 6 e do tipo 66 (Tabela V), cujas estruturas moleculares são apresentadas na Figura 12 e Figura 13, respetivamente. No entanto, a PA do tipo 66 é a mais usada apesar do seu custo ser superior à do tipo 6. As poliamidas podem ser aplicadas na indústria automóvel, têxtil, eletrónica entre outras aplicações<sup>26,32</sup>, sendo numerosas as designações pelas quais são conhecidas no mercado que variam segundo o fabricante: *Zytel™* (DuPont), *Ultramid™* (BASF), *Torayca™* (Toray), *Durethan™* (Bayer), *Capron™* (Allied Signal) e *Akulon™* (Akzo), são os nomes associados aos maiores fabricantes deste polímero<sup>33</sup>.

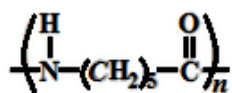


Figura 12 – Estrutura molecular da PA 6

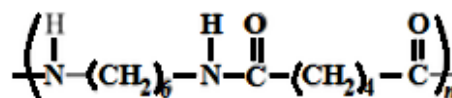


Figura 13 – Estrutura molecular da PA 66

Estes plásticos estruturais apresentam ainda elevado ponto de fusão, elevada resistência à tração, à abrasão, elevada dureza, baixo coeficiente de atrito, alta resistência à deformação plástica e reduzida solubilidade em solventes devido à sua estrutura semi-cristalina, ou seja, apresentam boas propriedades químicas, térmicas, mecânicas e também tribológicas.<sup>26,22</sup>.

A PA 6 e PA 66 destacam-se de entre as demais pela sua elevada resistência à tração. A PA 6 é mais indicada para aplicações em que se pretende elevada resistência ao impacto enquanto a PA 66 é preferida para situações que exigem maior dureza e rigidez. Nesta última, a adição de reforço, como a fibra de vidro, é importante complementando e melhorando as suas propriedades. Na Tabela V é possível examinar algumas das propriedades destes dois tipos de poliamidas.

**Tabela V – Propriedades gerais das poliamidas do tipo 6 e 66<sup>26, 32</sup>.**

	PA 6	PA 66
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,13	1,14
Resistência à tração (MPa)	76	80
Resistência ao impacto (J/m)	53	27 – 53
Dureza Rockwell	R112	R118
Módulo de elasticidade (MPa)	2800	3000
Resistência à flexão (MPa)	3,4	42
Coeficiente de expansão linear [cm/(cm. °C)]	9,5x10 <sup>-5</sup>	9,9x10 <sup>-5</sup>
Temperatura de fusão (°C)	215	255

A PA 66, devido aos elevados valores das suas propriedades, pode ser aplicada na fabricação de componentes para aviões, automóveis, máquinas, entre outros. O compósito obtido quando se procede ao reforço da PA 66 com fibra de vidro apresenta propriedades térmicas e mecânicas significativamente superiores àquelas apresentadas pela PA (Tabela VI), permitindo desempenhos superiores e alargando o leque de aplicações em produtos, como sejam, pás de ventiladores de motores, travões, revestimento de válvulas e caixas de colunas de direção<sup>32,34</sup>.

**Tabela VI – Propriedades da Poliamida do tipo 66 com e sem reforço em fibra de vidro<sup>34</sup>.**

	PA 66	PA66-GF30
Módulo de elasticidade (MPa)	1650	3200
Dureza Rockwell	M88	M76
Resistência ao impacto (J/m <sup>2</sup> )	-	≥ 50000
Limite de elasticidade (MPa)	90	100
Temperatura de fusão (°C)	255	255
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,14	1,29
Condutividade térmica a 23 °C (w/K m)	0,28	0,30
Coeficiente de expansão térmica 23-60°C (m/m K)	80 x 10 <sup>-6</sup>	50 x 10 <sup>-6</sup>
Coeficiente de expansão térmica 23-100°C (m/m K)	95 x 10 <sup>-6</sup>	60 x 10 <sup>-6</sup>

Para além de um melhor desempenho, o produto final em poliamida reforçado com fibra de vidro, compósito extremamente abrasivo, mostra-se indiferente à presença de ferramentas de corte, tendência que não é observada na poliamida sem reforço o que confere à poliamida reforçada uma melhor resistência mecânica e uma rugosidade mais acentuada, ou seja, um acabamento superficial defeituoso<sup>34</sup>.





### 2.2.5 Aditivos

Os aditivos são utilizados essencialmente para alterar as propriedades do material, podendo atuar em várias frentes como por exemplo, melhorando o seu processamento, prevenindo ou minimizando a sua degradação, aumentando a durabilidade do produto final, conferindo a cor desejada, tornando o produto final mais barato, levando globalmente a benefícios económicos. A escolha dos aditivos depende do tipo de polímero e da aplicação que se pretende<sup>35</sup>.

Em geral, os aditivos devem apresentar características relevantes para o bom funcionamento do produto final, tais como:

- Estabilidade sob condições de processamento;
- Estabilidade em condições de serviço;
- Não-tóxicos;
- Não transmissão de paladar ou odor;
- Apresentar um custo aceitável;
- Não afetar, de uma forma negativa, as propriedades do polímero.

Em termos de funcionalidade, os aditivos podem classificar-se como plastificantes, lubrificantes, agentes de anti-envelhecimento, retardadores de fogo, corantes ou pigmentos, agentes de expansão, aditivos de proteção contra a degradação por UV e agentes de ligações cruzadas, entre outros<sup>36</sup>. Seguidamente abordar-se-ão apenas o tipo de aditivos que são incorporados na formulação usada para fabricar os rolamentos, como é o caso dos lubrificantes e corantes.

Os lubrificantes são aditivos usados para facilitar o processamento pela redução da fricção interna ou externa, contribuindo para o aumento da produtividade, para um menor desgaste do equipamento e para uma melhoria dos consumos energéticos. Frequentemente os lubrificantes aparecem com diferentes designações conforme a função que lhes é exigida. Podem distinguir-se os seguintes tipos:

- 1) Lubrificantes externos: substâncias que em geral não se misturam com o polímero, são usados quando se pretende reduzir a fricção entre a superfície da ferramenta (molde) e o polímero, de modo a facilitar movimentos na ferramenta. Estes lubrificantes são compostos com um baixo grau de solubilidade no polímero e com uma grande afinidade relativamente aos metais, pelo que tendem a migrar para a superfície do produto formando uma película durante o processamento. Para que



este lubrificante atue de uma forma eficaz é necessário ter em conta o tipo de polímero e a gama de temperaturas a que vais estar sujeito durante o processamento

- 2) Lubrificantes internos: substâncias razoavelmente solúveis no polímero com capacidade para melhorar o processamento do mesmo. Por exemplo polímeros com baixo peso molecular como por exemplo PE e PP são considerados lubrificantes internos, uma vez que promovem o fluxo no estado fundido, de que resulta uma menor viscosidade e um menor consumo energético no processo. Neste caso não são necessários lubrificantes externos, e caso sejam utilizados devem ser utilizados de uma forma moderada, caso contrário são um obstáculo para a eficiência do lubrificante interno<sup>36,37,38</sup>.

Os corantes e pigmentos são aditivos destinados a conferir uma cor à peça final, que é diferente da cor do polímero no estado inicial; tratam-se assim de aditivos destinados a realçar as propriedades estéticas e visuais do produto final.

Os corantes são moléculas de pequenas dimensões, solúveis no polímero, que conferem uma cor diferente ao produto final. Os pigmentos são em geral compostos, na forma de partículas, não solúveis no polímero.

Os corantes têm a vantagem de não serem abrasivos, apresentam elevada capacidade de absorção luminosa e permitem que os polímeros não percam as suas propriedades. No entanto, apresentam uma baixa resistência a produtos químicos, o seu custo é superior relativamente aos pigmentos e a sua facilidade de migração para a superfície do produto pode tornar-se numa grande desvantagem, levando a mudanças de coloração no produto que, no futuro, podem colocar problemas de toxicidade.

Os pigmentos, comparativamente aos corantes, não migram para a superfície do produto, são mais baratos e detêm baixa toxicidade. No entanto, os pigmentos são compostos mais abrasivos, difíceis de dispersar e, esteticamente, são mais opacos<sup>37,39</sup>.

### *2.2.6 Fases de reforço*

As fases de reforço têm como principal objetivo reforçar ou melhorar as propriedades mecânicas dos polímeros. São assim materiais quimicamente diferentes do polímero que são adicionados ao polímero, estabelecendo-se entre ambos uma interface que favorece a sua união. A junção dos dois tipos de fases – fase matriz ou material maioritário e fase dispersa ou material de reforço – forma um compósito. A fase dispersa pode apresentar-se na forma de



partículas, laminada ou fibras, sendo esta última uma das mais importantes em compósitos de matriz polimérica, destacando-se entre elas as fibras de carbono, de vidro e os de aramido (Tabela VII).

**Tabela VII – Propriedades das fibras de carbono, de vidro e de aramida usadas como fase de reforço<sup>40</sup>.**

Fibras	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistencia à tração [MPa]	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Diâmetro da fibra [μm]
Carbono	25 - 110	1400 - 3100	1,90 – 2,15	8 – 11
Vidro	10 – 12,5	3040 - 4650	2,48 – 2,62	30
Aramido	20	2830	1,44	---

Para além dos tipos de fibras anteriormente mencionados destacam-se também as fibras de UHMWPE, formadas pelo processo de *gel-spinning* que consiste na separação das cadeias poliméricas dissolvidas e no seu posterior alinhamento, resultando fibras com diâmetros de 27 μm. A utilização deste tipo de fibras é menos usual, devido ao seu elevado custo e difícil processamento são pouco usuais.

Seguidamente, abordar-se-ão de forma mais detalhada as fibras de vidro por constituírem as fases de reforço usadas no presente trabalho.

As fibras de vidro foram utilizadas pela primeira vez em 1971 em polímeros termoplásticos, por *Everstine* e *Rogers*<sup>41</sup>, com o objetivo de reforçar as propriedades mecânicas, designadamente o módulo de elasticidade do produto final. Este tipo de produtos pode reforçar os plásticos sob diversas formas, como por exemplo fios, tecidos, fios cortados, fibras moídas, ou suas combinações. Relativamente aos requisitos, as fibras de vidro devem satisfazer as seguintes condições<sup>41</sup>:

- Apresentar um elevado módulo de elasticidade de modo a favorecer o do plástico;
- Apresentar uma elevada resistência à tração;
- Mostrar uma variação de força praticamente inalterável quando comparadas entre si;
- Apresentar geometria uniforme;
- Serem estáveis de forma a garantir a salvaguarda da sua resistência durante o seu manuseamento e fabrico.

Para garantir uma adesão eficaz às fibras de vidro e contribuir para a ordenação das mesmas melhorando a qualidade da peça, a matriz polimérica, deve: (i) dispersar e separar as fibras de modo a evitar possíveis fissuras que afetam de forma devastadora a resistência

mecânica do compósito ou alterem a superfície das mesmas; (ii) ser quimicamente e termicamente compatível com as fibras durante um longo período de tempo (iii) transmitir tensões superficiais na interface das duas fases durante a sua formação <sup>41</sup>.

A interface entre a fibra de vidro e a matriz polimérica é uma região com uma microestrutura anisotrópica, não homogênea, que deve proporcionar as ligações químicas adequadas e fisicamente estáveis entre as fibras e a matriz.

A fibra de vidro está normalmente revestida por uma substância promotora de adesão que se designa por agente de acoplamento ou agente de colagem. Este agente, para a maioria dos termoplásticos, é um aminosilano como por exemplo o 3-aminopropiltrietoxissilano (APTES) cuja estrutura molecular se ilustra na Figura 14<sup>42, 43</sup>.

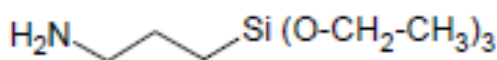


Figura 14 – Estrutura molecular do 3-aminopropiltrietoxissilano (APTES)<sup>42</sup>.

Este tipo de composto apresenta um grupo hidrolisável (um grupo alcóxi com por exemplo o -OCH<sub>2</sub>H<sub>5</sub>) e um grupo orgonofuncional não hidrolisável (como por exemplo o grupo amina, -NH<sub>2</sub>), conjugando assim dois tipos de reatividade na mesma molécula, uma inorgânica e outra orgânica, que permitem a ligação entre o vidro (reforço) e o polímero (matriz). A interface que se estabelece entre a fibra silanizada e a matriz polimérica está ilustrada na Figura 15<sup>42</sup>.

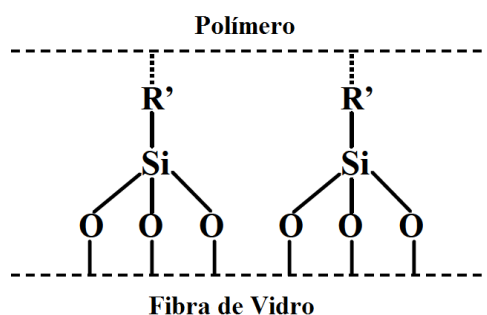


Figura 15 – Esquemática da interface entre o polímero e a fibra de vidro<sup>42</sup>

Os silanos com grupos funcionais amino têm sido vulgarmente utilizados na poliamida 6, um termoplástico polimerizado por reações de condensação. Este mecanismo consiste na reação, através ligações de hidrogénio, do grupo amino (-NH<sub>2</sub>) do silano com os grupos dos



ácidos carboxílicos (-COOH) terminais das cadeias de PA<sup>44, 45</sup> quando o compósito se encontra no estado fundido para formar as amidas<sup>42, 43</sup>.

A qualidade da interface é um parâmetro importante porque está diretamente relacionada com as propriedades mecânicas do compósito. Quanto melhor for esta interface, melhor será a aderência entre a matriz e as fibras de vidro e, por consequência melhor será a sua resistência à tração e ao impacto<sup>42, 45</sup>.

Materiais reforçados com fibra de vidro apresentam melhorias nas especificações mecânicas e térmicas, destacando um grau de superioridade na força e na resistência; um coeficiente de expansão térmica mais baixo, abrandando a probabilidade de problemas na concepção e boas propriedades isoladoras<sup>41,46,37</sup>. Para além disso, a fibra de vidro confere ao polímero uma menor absorção de água<sup>47</sup>.

## 2.3 Processo de injeção

A injeção de plásticos é o método de conformação utilizado pelo Grupo Moldoeste II. Tem como princípio básico a injeção de polímero fundido para o interior da(s) cavidade(s) do molde, cuja superfície, encontrando-se a uma temperatura inferior à do fundido, permite que este solidifique sob a geometria imposta pela cavidade, obtendo-se a moldação que é retirada posteriormente, quando o molde abre. Esta técnica de moldação de polímeros teve um grande desenvolvimento no anos 40, 50 e 80, e continuou a suscitar um elevado interesse após estas décadas<sup>35,17</sup>.

O processo de injeção opera em regime descontínuo e a sua utilização é extensível a praticamente todos os termoplásticos. Do ponto de vista dos equipamentos, o processo de injeção abrange fundamentalmente quatro unidades: a unidade de potência que fornece a energia necessária para o funcionamento do processo; a unidade de comando para que haja uma monitorização e controlo das variáveis do processo; a unidade de injeção que assegura o transporte, aquecimento, plasticização e homogeneização da matéria-prima e a unidade de fecho, que garante a fixação do molde (Figura 16). O processo de injeção inicia-se com a introdução de polímeros e aditivos numa tremonha que os deposita sobre um parafuso em rotação no interior de um cilindro aquecido. O atrito entre parafuso e cilindro, coadjuvado por bandas de aquecimento estrategicamente colocadas ao longo do cilindro, asseguram o perfil de temperaturas que promove a fusão do polímero que é, então, injetado na(s) cavidade(s) de um molde onde é mantido e arrefecido até solidificar com a forma conferida pela cavidade do

molde. O molde pode ter uma ou mais cavidades, conforme o tipo de peça a produzir. É um processo em que se distinguem as seguintes etapas básicas<sup>17</sup>:

- 1ª) O plástico, à medida que avança sobre o parafuso da injetora e com o aumento da temperatura vai fundido e sendo homogeneizado até adquirir viscosidade uniforme;
- 2ª) O plástico fundido é introduzido no molde sob um regime de pressão que visa assegurar o correto preenchimento de toda a concavidade do molde;
- 3ª) Após o preenchimento total, o molde é arrefecido e o produto final inicia a sua solidificação. Nesta operação o produto adquire as suas propriedades finais.

Estas etapas sucedem-se sequencialmente constituindo o que é normalmente designado por ciclo de injeção ou de moldação.

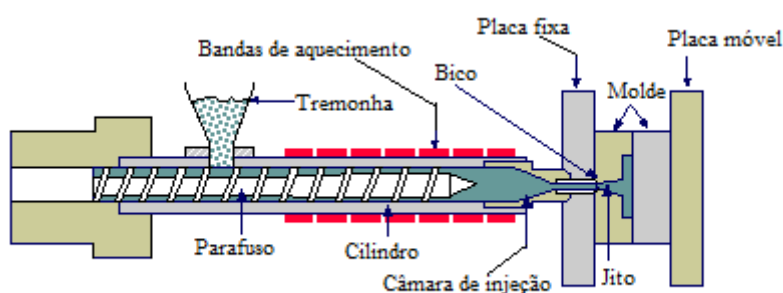
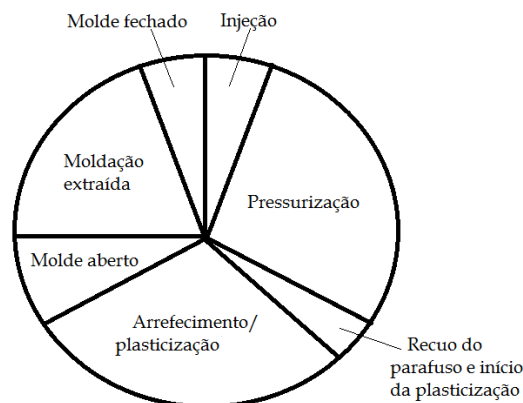


Figura 16 – Esquemática do processo de injeção de plásticos<sup>48</sup>.

### 2.3.1 Ciclo de moldação

O ciclo de moldação, ilustrado na Figura 17, inclui os seguintes passos:

- 1- O ciclo inicia com o fecho do molde no menor tempo possível. Enquanto o molde é fechado o plástico está no cilindro a ser fundido e homogeneizado;
- 2- De seguida, o parafuso avança para a extremidade do cilindro e ocorre a injeção do plástico para o molde;
- 3- Para que não haja defeitos nem rebarbas, há uma correta pressão exercida sobre o molde que força o plástico a ocupar o espaço vazio do molde;
- 4- Quando o plástico finaliza o preenchimento do molde, há um recuo do parafuso e plasticização de novo material para ser injetado;
- 5- Ocorre o arrefecimento do molde e o produto começa a adquirir as suas características finais;
- 6- O molde abre e dá-se início a um novo ciclo de injeção;
- 7- Ocorre uma pausa enquanto o novo plástico atinge as condições para ser injetado e a peça final obtida no ciclo anterior é retirada.



**Figura 17 – Sequência de passos que constituem o ciclo de moldção<sup>35</sup>.**

O ciclo de injeção pode ser afetado por variáveis operatórias da máquina de injeção, do molde e por características do molde e do próprio material<sup>16,35,17</sup>. Neste contexto são de particular relevo a temperatura do molde, a pressão de injeção ou velocidade de injeção, a temperatura do plástico injetado, a viscosidade do plástico, o tipo de parafuso, as tensões internas do molde, o tempo de injeção, entre outros que influenciam, significativamente, as propriedades do plástico moldado<sup>17</sup>.

### *2.3.2 Variáveis de controlo no processo de injeção*

Como anteriormente referido são diversas as variáveis do processo de injeção que devem ser ajustadas e controladas para que o acabamento superficial e a aparência deem ao produto final as condições ideais<sup>17, 49</sup>.

#### **Pressão**

Associadas à injeção do plástico distinguem-se três tipos de pressões: a pressão de injeção, a pressão de compactação e a contrapressão. A pressão de injeção é a pressão essencial para forçar o plástico fundido para o interior do molde e, o seu valor depende do tamanho do molde, do tipo material e da complexidade do molde. A pressão de compactação ou 2ª pressão de injeção é a pressão que é exercida quando o plástico já se encontra todo no molde, de modo a compactar a peça e a evitar a contração ou defeitos na peça. A contrapressão é a pressão exercida quando o fuso recolhe durante a dosagem do material<sup>17, 50</sup>.



## Temperatura

O perfil de temperaturas ao longo do fuso, a temperatura do molde, e seu comportamento durante o arrefecimento, são as principais temperaturas no processo de injeção. A distribuição de temperaturas ao longo do fuso é importante porque é responsável pela fusão do material e pela boa homogeneização entre o material e possíveis aditivos (como por exemplo corantes). A temperatura do molde, por ter uma grande influência sobre as propriedades, o estado de superfície das peças e a sua geometria e no acabamento das peças, precisa de ser controlada através de canais de aquecimento, por forma a distribuir uniformemente o calor pelo molde. O arrefecimento do molde possibilita a solidificação do polímero e determina a resistência mecânica final da peça<sup>17,50,49,51,52</sup>

## Velocidade de injeção

A velocidade de injeção faculta o preenchimento global do molde num tempo adequado, por forma a evitar o aparecimento de rebarbas, rechupes ou outro tipo de defeitos<sup>17, 50</sup>.

## Rotação do fuso

Esta variável influencia a homogeneização da matéria-prima no canhão e no ciclo de moldação. A rotação do fuso deve ser controlada pois, se excessiva, contribui para o aumento do atrito entre o fuso e a matéria-prima, o que pode ocasionar possíveis degradações de matérias-primas mais suscetíveis com penalização das propriedades da mesma<sup>17, 50</sup>.

## Tempo

Relativamente a esta variável distingue-se o tempo de injeção, o tempo de compactação e o tempo de arrefecimento. O tempo de injeção é o tempo que a matéria-prima demora a sair do canhão para o interior do molde, ou seja, é o intervalo em que o parafuso avança no fuso e injeta o material até à finalização do mesmo. O tempo de compactação é o tempo durante o qual é aplicada pressão para que a peça adquira a forma do molde. Se a peça formar rebarba, o tempo de compactação terá que ser reduzido. O tempo de arrefecimento é o tempo em que a peça permanece no molde a arrefecer, passando de estado viscoso para estado sólido<sup>17, 50</sup>.

Na Tabela VIII é possível analisar a importância ou as consequências da variação das diversas variáveis referidas precedentemente.



Tabela VIII – Efeitos da alteração das principais variáveis no processo de injeção de plásticos<sup>53, 50, 54</sup>.

VARIÁVEL PROCESSUAL (V.P.)	VALOR DE V.P. ABAIXO DO VALOR DESEJADO	VALOR DE V.P. ACIMA DO VALOR DESEJADO
<b>Pressão de injeção</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vazios</li> <li>• Rechupes</li> <li>• Bolhas</li> <li>• Alteração das dimensões da peça</li> <li>• Imperfeições na superfície (ex.: raiados)</li> <li>• Moldações incompletas</li> <li>• Linhas de fluxo visíveis (ou linhas de solda)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rebarbas</li> <li>• Dificuldades na desmoldação</li> <li>• Empenamentos</li> </ul>
<b>Pressão de compactação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rechupes</li> <li>• Alteração das dimensões da peça</li> <li>• Rebarbas</li> <li>• Instabilidade dimensional (contração da peça)</li> <li>• Alteração no peso final da peça</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rebarbas</li> <li>• Instabilidade dimensional (extensão da peça)</li> <li>• Dificuldades na desmoldação</li> </ul>
<b>Contrapressão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Camada de ar</li> <li>• Vazios</li> <li>• Falta de homogeneização</li> <li>• Fundição da matéria-prima incompleta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bolhas</li> <li>• Marcas de queimadura</li> <li>• Degradação do material por excesso de fricção</li> <li>• Menor rendimento na plastificação</li> </ul>
<b>Temperatura do molde</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Imperfeições na superfície (ex.: raiados, mais baça)</li> <li>• Superfícies ásperas (peças com fibra de vidro, por exemplo)</li> <li>• Bolhas</li> <li>• Moldações incompletas</li> <li>• Vazios</li> <li>• Linhas de fluxo visíveis</li> <li>• Aumento das tensões internas na peça</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empenamentos</li> <li>• Maior tempo de arrefecimento</li> <li>• Alteração das dimensões da peça</li> <li>• Dificuldades na desmoldação</li> </ul>
<b>Temperatura ao longo do fuso</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matéria-prima não homogênea</li> <li>• Maiores tensões internas na peça</li> <li>• Maior pressão para injetar</li> <li>• Linhas de fluxo visíveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação das propriedades térmicas</li> <li>• Maior tempo de arrefecimento</li> <li>• Menores propriedades mecânicas</li> <li>• Marcas de queimadura</li> </ul>
<b>Temperatura de arrefecimento no molde</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empenamentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empenamentos</li> </ul>



<b>Velocidade de injeção</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Imperfeições na superfície (ex.: raiados)</li><li>• Rechupes</li><li>• Moldações incompletas</li><li>• Linhas de fluxo visíveis</li><li>• Superfícies ásperas (peças com fibra de vidro, por exemplo)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Marcas de queimadora</li><li>• Rebarbas</li><li>• Defeitos na superfície junto ao ponto de injeção</li><li>• Dificuldades na desmoldação</li><li>• Vazios</li></ul>
<b>Rotação do fuso</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Défice de homogeneização</li><li>• Imperfeições na superfície</li><li>• Oscilações na duração do ciclo</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Estrias com uma cor acinzentada</li><li>• Aparência turva</li><li>• Detioração das propriedades térmicas e mecânicas</li><li>• Desgaste do fudo</li></ul>
<b>Tempo de injeção</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rechupes</li><li>• Moldações incompletas</li><li>• Linhas de fluxo visíveis</li><li>• Vazios</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rebarbas</li></ul>
<b>Tempo de compactação</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rechupes</li><li>• Instabilidade dimensional</li><li>• Bolhas</li><li>• Alteração no peso final da peça</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rebarbas</li><li>• Maiores tensões na peça</li><li>• Maior consumo energético</li></ul>
<b>Tempo de arrefecimento</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Marcas de ejetores</li><li>• Maior contração após desmoldação</li><li>• Imperfeições na superfície</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Empenamentos</li><li>• Maior tempo de ciclo</li></ul>
<b>Força de ejeção</b>		<ul style="list-style-type: none"><li>• Marcas de ejetores</li></ul>

## Capítulo 3

# Formulação do Problema



Como já foi referido, o presente trabalho visa essencialmente identificar e estudar parâmetros influentes no processo de injeção por forma a minimizar a ocorrência de não conformidade ou rejeição do produto final, o rolamento.

O rolamento produzido pela Moldoeste II pelo seu carácter inovador e tecnologia de fabrico, pretende afirmar-se no mercado, oferecendo uma série de vantagens aos fabricantes e ao utilizador do automóvel, entre as quais se destacam um processamento mais simplificado, uma produção de baixo custo, uma maior fluência e face aos rolamentos de metal. Este rolamento, que suporta uma carga axial de cerca 5 kN, é fundamentalmente constituído por dois elementos e um anel tal como se ilustra na Figura 18. Na Tabela IX descreve-se a composição da matéria-prima usada na fabricação de cada um dos constituintes do rolamento.

**Tabela IX – Composição da matéria-prima usada na fabricação dos constituintes do rolamento produzido pela Moldoeste**

Constituintes do rolamento	Matéria-prima (tipo de polímero)	Designação comercial (tipo de polímero)	% Polímero	Aditivo	
				% Aditivo	Designação comercial
Superior	POM	Ultraform N2320 0035 (Natural)	98%	2%	80-31M Black
Anel	UHMWPE	Lubmer L5000 (Natural)	99%	1%	PEX 3180 Sky BLUE
Inferior	PA66 – GF30	Ultramid A3EG6 (Black)	100%	-----	-----



**Figura 18 – Elementos constituintes do rolamento polimérico produzido pela *Moldoeste II*.**

A montagem e as propriedades mecânicas que os elementos exibem podem, por vezes, condicionar o funcionamento do mesmo. Este condicionamento está diretamente relacionado com as condições de processamento, com o meio não controlado a que os rolamentos estão expostos (possibilidade de contração), à presença de defeitos (como por exemplo rebarbas e imperfeições na peça), à incorreta montagem do rolamento, às excessivas oscilações que este sofre durante o seu funcionamento e com a variação do teor de reciclado utilizado em cada elemento do rolamento, tendo influência no torque e nas tensões máximas.

Contudo, estes problemas poderão estar associados, também, a uma avaliação menos rigorosa ou pouco eficiente no controlo de qualidade de cada elemento e no conjunto dos elementos, como é o caso dos testes “go”/ “no-go” realizados de forma manual na *Moldoeste II* e que consistem em avaliar o funcionamento do rolamento ao nível do torque. Para além disso, a ausência de um controlo rigoroso do teor de reciclado utilizado nas formulações usadas, as diversas variáveis processuais utilizadas na injeção de cada tipo de constituinte e o meio ambiente a que estão expostos também são fortes causas para a não conformidade do rolamento.



Este trabalho focar-se-á, essencialmente, no estudo do efeito da adição de material reciclado à formulação usada na produção dos elementos (o superior e o inferior), na apreciação do efeito do teor de aditivo utilizado na resistência mecânica das peças e na análise da morfologia da fase de reforço que é um componente fulcral para a garantia do bom funcionamento do rolamento. Serão também avaliados aspetos influentes na tribologia do rolamento.

Para efetuar estes estudos serão executadas uma série de tarefas suportadas por técnicas diversas (Tabela X) que visam analisar e interpretar a importância da variação do teor de reciclado nas diversas formulações. Estas técnicas usadas serão abordadas com maior detalhe no próximo capítulo.

**Tabela X – Lista de tarefas a executar no presente trabalho.**

<b>Tarefas</b>	<b>Técnica utilizada</b>
Avaliação do funcionamento do rolamento	Momento de força ou Torque
Avaliação da resistência mecânica	Ensaio de tração
Análise da degradação do material	DSC
Análise da viscosidade do material	MFI
Análise do aspeto superficial	Rugosidade
Análise da interação matriz polimérica – fibras de vidro	SEM

## Capítulo 4

### Procedimiento Experimental

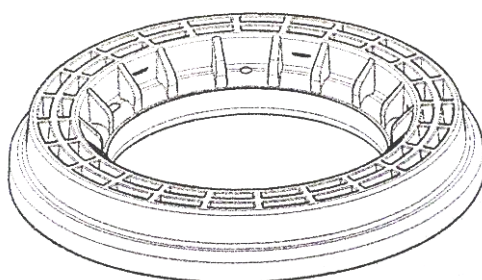
Neste capítulo serão apresentadas as técnicas de caracterização que suportam os ensaios experimentais realizados ao longo deste trabalho bem como os polímeros usados na produção dos elementos do rolamento. Os polímeros (matéria-prima) serão apresentados na secção 4.1 e as técnicas experimentais serão abordadas na secção 4.2.

## 4.1 Matéria-prima

### 4.1.1 POM

Esta matéria-prima, utilizada pela empresa *Moldoeste II* para a produção do rolamento, é fornecida pela BASF e denominada comercialmente por *ULTRAFORM N2320 0035*<sup>®23, 24</sup>.

O elemento superior, ilustrado na Figura 19, é o que exige um maior rigor no controlo das suas características devido à sua função relativamente ao anel e ao baixo coeficiente de atrito que lhe é exigido. Este conjunto de razões justificam a escolha do POM para a sua fabricação dadas as suas propriedades anteriormente referidas.



**Figura 19 – Elemento superior do rolamento polimérico produzido na *Moldoeste II*.**

Na fabricação deste elemento, o POM é aditivado com 2% de um pigmento com propriedades lubrificantes que lhe confere a cor negra.

Esta matéria-prima, no caso de estar completamente selada na embalagem onde se encontra armazenada, não necessita de secagem antes de ser injetada. Contudo, no caso do saco ser aberto durante um longo período de tempo, é conveniente colocá-la numa estufa à temperatura entre 80°C e 110°C. O tempo de secagem depende da humidade presente na matéria-prima, devendo rondar entre 2 a 4 horas.

Segundo a BASF, a temperatura de injeção do POM deve situar-se entre 190°C e 230 °C, a temperatura do molde entre 60°C e 120°C e a pressão de injeção entre 35 e 70 bar. Relativamente à velocidade e à pressão de injeção, estas devem ser otimizadas consoante as



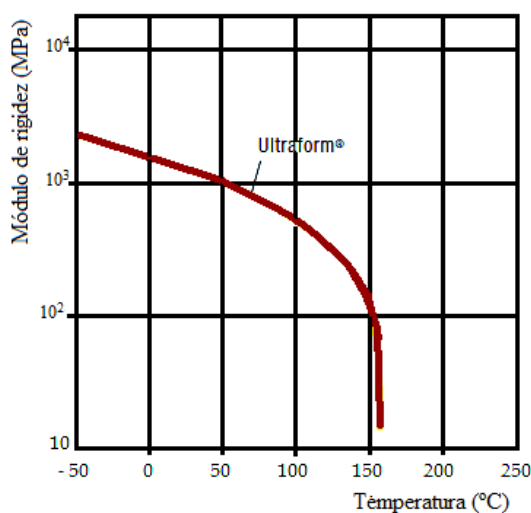


características finais pretendidas para a peça<sup>23</sup>. Na Tabela XI é possível analisar algumas das propriedades e condições de injeção relativamente a esta matéria-prima.

**Tabela XI – Propriedades e condições de injeção do Ultraform N2320 0035<sup>®</sup>**<sup>23, 24</sup>.

Ultraform N2330 0035 <sup>®</sup> - Propriedades gerais	
Densidade	1,4 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	2450 MPa
Absorção de água	0,8%
Condutividade térmica	0,30 W/K.m
Resistência ao impacto (Charpy com entalhe – a 23°C)	6,5 kJ/m <sup>2</sup>
Temperatura do molde	60 – 120 °C
Ponto de Fusão – DSC	167 °C
Temperatura de Transição Vítrea – DSC	- 65 °C
Temperatura de injeção (moldagem por injeção)	190 – 230 °C

O *ULTRAFORM N2320 0035<sup>®</sup>*, do ponto vista técnico, apresenta o benefício de manter as suas propriedades mecânicas constantes devido ao facto de entre a temperatura de transição vítrea e a temperatura de fusão não sofrer quaisquer transições, circunstância que pode ser observada na Figura 20 que demonstra uma pequena variação do módulo de rigidez ao longo de um intervalo longo de temperatura<sup>25</sup>.



**Figura 20 – Variação do módulo de rigidez do *Ultraform N2320 0035<sup>®</sup>* em função da temperatura (medido de acordo com a norma ISO 6721)<sup>25</sup>.**

#### 4.1.2 PA66-30GF

O polímero PA 66 é um dos termoplásticos mais versáteis, que pode ser utilizado em diversas aplicações, e que apresenta propriedades adequadas para a substituição do metal, sendo também de processamento acessível<sup>55</sup>.

O compósito PA 66 aditivado com 30% de fibra de vidro (PA66-30GF) utilizado pela Moldoeste II na fabricação do elemento inferior (Figura 21) é a *ULTRAIMID A3EG6*<sup>®</sup> da BASF. Com este compósito pretende-se reforçar as propriedades mecânicas do rolamento conferindo-lhe uma maior rigidez, estabilidade dimensional e resistência mecânica.

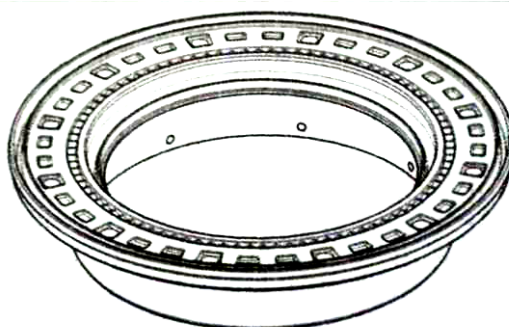


Figura 21 – Elemento inferior do rolamento polimérico produzido na *Moldoeste II*.

Relativamente a recomendações técnicas, a BASF aconselha que esta matéria-prima seja submetida no bico de injeção a uma temperatura situada entre 280°C e 300°C. Quanto à temperatura do molde, esta deve situar-se entre 80°C e 90°C (Tabela XII). A aparência da superfície do produto final é afetada pelos parâmetros de injeção, designadamente pressão de injeção, velocidade de injeção e temperatura do molde, como já foi mencionado no fim do capítulo 2 deste trabalho.

Tabela XII – Propriedades e condições de injeção da *Ultramid A3EG6*<sup>®</sup> (PA66-30GF)<sup>47, 56</sup>.

Ultramid A3EG6 <sup>®</sup> - Propriedades gerais	
Densidade	1,36 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	10000 MPa
Absorção de água	5,2 – 5,8 %
Condutividade térmica	0,35 W/K.m
Resistência ao impacto (Charpy com entalhe – a 23°C)	13 kJ/m <sup>2</sup>
Temperatura do molde	80 – 90 °C
Ponto de Fusão – DSC	260 °C
Temperatura de Transição Vítrea – DSC	50 °C
Temperatura de injeção (moldagem por injeção)	280 – 300 °C



A *ULTRAIMID A3EG6*<sup>®</sup> deve ser conservada no saco hermeticamente selado para que não absorva humidade e para que as suas propriedades térmicas não se degradem, dispensando à partida, a secagem antes do processo de injeção. No caso da secagem ser necessária com o intuito de retirar a humidade, a BASF aconselha que a matéria-prima seja exposta a temperaturas compreendidas entre 80°C e 110°C numa estufa entre 2 a 4 horas.

#### 4.1.3 UHMWPE

Neste subcapítulo, apesar de se dar destaque a esta matéria-prima que está presente neste tipo de rolamentos, mais propriamente na composição do elemento (anel) que se encontra entre os dois elementos referidos anteriormente e bloqueado no elemento inferior, ela não será caracterizada neste relatório.

O UHMWPE é a base do anel, um dos componentes do rolamento polimérico (Figura 22). Este componente tem como objetivo proporcionar ao rolamento um comportamento tribológico mais eficaz e evitar a presença exagerada de lubrificante.

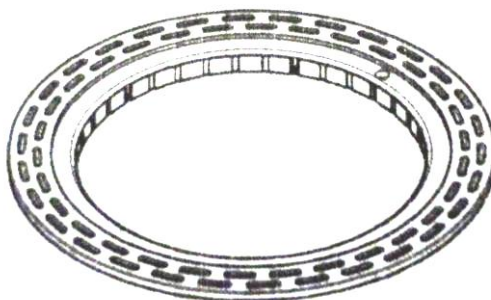


Figura 22 – Anel do rolamento polimérico produzido na *Moldoeste II*.

A matéria-prima usada na Moldoeste II é produzida pela *Mitsui Chemicals* e designada por *LUBMER*<sup>®</sup> *L5000*. É um polietileno especial e destaca-se pela sua propriedade de auto-lubrificação. Para além desta propriedade, este polímero apresenta uma elevada resistência mecânica, boa resistência química, baixa absorção de água e boa resistência à abrasão. Uma vez que apresenta um baixo coeficiente de atrito, a vida do produto final é maior e o deslizamento entre peças é realizado de uma forma mais eficiente<sup>57</sup>.

Devido à sua dificuldade no processamento, pode baixar-se o peso molecular do UHMWPE, de forma a introduzi-lo no processo de injeção e reter ainda as suas características essenciais<sup>57</sup>.



O LUBMER® L5000 não necessita de nenhuma secagem prévia devido à baixa absorção de humidade, podendo ser aplicado na indústria automóvel, eletrónica ou no desenvolvimento de materiais de construção<sup>57</sup>.

Relativamente às propriedades e condições de injeção do LUBMER® L5000 estas estão descritas na Tabela XIII.

Tabela XIII – Propriedades e condições do Polietileno de Ultra Elevado Peso Molecular (UHMWPE)<sup>57</sup>.

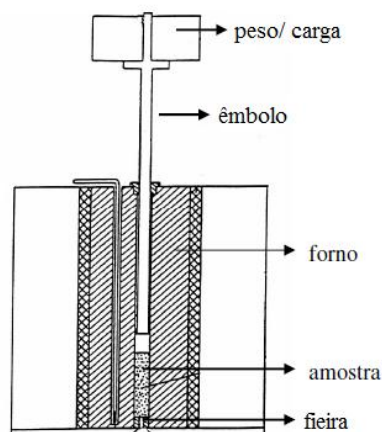
Lubmer® L5000 - Propriedades gerais	
Densidade	0,966 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade (a 23°C)	750 MPa
Absorção de água	0,01 %
Condutividade térmica (a 23°C)	0,40 W/K.m
Temperatura do molde	24 – 40 °C
Ponto de Fusão – DSC	135 °C
Temperatura de Transição Vítrea – DSC	–
Temperatura de injeção (moldagem por injeção)	240 – 265 °C

## 4.2 Técnicas Experimentais de Caracterização

### 4.2.1 Análise reológica – Índice de Fluidez (MFI)

O Índice de Fluidez, vulgarmente conhecido por MFI ou MI, é considerado um parâmetro importante na indústria dos plásticos. De fácil e rápida execução, a técnica de determinação do MFI permite obter a uma data temperatura e sob ação de uma determinada força (peso), dados sobre a viscosidade do polímero e indiretamente sobre a sua massa molar.

Segundo a norma EN ISO 1133 aprovada a 19 de Maio de 2005, o índice de fluidez em massa (MFR) é definido como a **“velocidade de extrusão de uma resina fundida numa fieira de comprimento e diâmetro especificados sob determinadas condições de temperatura, de carga e de posição do êmbolo no cilindro de um plastómetro de extrusão, expressa em termos de massa extrudida por intervalo de tempo especificado”** (Figura 23). As Unidades Internacionais do MFI são expressas, normalmente, em g/ 10 min, ou seja, é a massa do polímero que flui pela fieira durante 10 minutos<sup>58</sup>.



**Figura 23 – Esquema representativo dos principais constituintes do plastómetro<sup>58</sup>.**

A medição do MFI realizou-se num plastómetro modelo MFI-9, equipamento da *Davenport* (Figura 24).



**Figura 24 – Equipamento (MFI-9) utilizado para a determinação do MFI. Adaptado de <sup>59</sup>**

O MFI-9 apresenta especificações de acordo com as normas BS 2782 Parte 7: Método 720S, ISO 1133, ASTM D1238 Método A e, em termos dimensionais (Figura 25) corresponde a um equipamento com um cilindro de 9,55 mm de diâmetro e 48 mm de comprimento e uma fieira com um diâmetro de 2,095 mm.

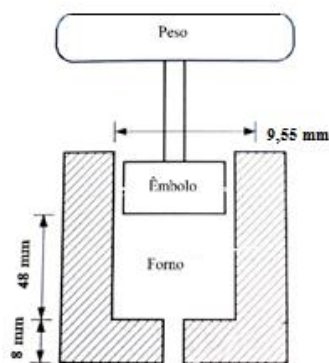


Figura 25 – Zona do ensaio – aspetos dimensionais.

A determinação do MFI consiste em fixar no plastómetro uma temperatura previamente estabelecida para a resina em causa e aguardar pela sua estabilização; a resina, em forma de grânulos, é colocada no interior do cilindro e compactada, ficando exposta a um determinado peso ou carga (Figura 26) conforme o tipo de resina (Tabela XIV). Após a colocação do peso, a resina começa a sair pela fieira a uma velocidade constante e, ao fim de um determinado tempo, é cortada em segmentos.



Figura 26 – Cargas para a medição do MFI.

Os segmentos de material extrudido são pesados de forma a registar e calcular o seu valor em g/ 10 min.

Assim, o MFI é representado pela massa extrudida por intervalo de tempo especificado, expresso em gramas por 10 minutos (Equação 1).

$$MFI (g/10min) = \frac{Peso (g) \times 600 (seg)}{t (seg)} \times 100 \quad (1)$$



O peso refere-se à pesagem final das amostras do ensaio e o  $t$  ao intervalo de tempo entre dois cortes na amostra. Para além disto, é preciso ter em conta que nesta equação os fatores temperatura de ensaio, expressa em  $^{\circ}\text{C}$ , e a carga nominal, expressa em kgf também são fatores relevantes.

**Tabela XIV – Condições do ensaio de determinação do MFI das matérias-primas utilizadas.**

Material Testado	Condições				
	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Peso de Carga (kgf)	Tempos de corte (seg)	Nº de amostras (mínimo)	Estufa
POM	190	2,16	15	5	Não
PA66 – 30% FV	275	5	5	5	Sim

#### *4.2.2 Análise térmica - Curvas de Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC)*

A Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC – *Differential Scanning Calorimetry*) é uma técnica que permite detetar mudanças físicas e/ou químicas no polímero através da ocorrência de trocas de calor entre a amostra e uma amostra referências – (cadinho vazio), ou seja, permite detetar a energia calorífica associada a reações e transições de fase do material em função da temperatura. Em cada momento do ensaio as temperaturas do ensaio as temperaturas da amostra e da referência são mantidas iguais e, ao longo do ensaio, a temperatura é controlada de forma a assegurar um determinado perfil de aquecimento ou de arrefecimento. A Figura 27 tipifica o registo obtido num ensaio DSC com uma mostra polimérica onde se identificam eventos endotérmicos (mudança de fase-fusão) e exotérmicos (reação de cristalização e de oxidação) bem como uma alteração na orientação de linha de base, indiciadora de variação de calor específico, que assinala a passagem de um estado viscoso a um estado frágil, ou seja, uma temperatura de transição vítrea. A análise deste tipo de registos permite assim determinar nos polímeros, as temperaturas de fusão, de cristalização, as variações de entalpia associadas a transição de fase, reação química e à cristalização (Figura 27 e Figura 28).

No presente estudo recorreu-se assim à técnica DSC para estudar o comportamento térmico do POM e da PA66 reforçada com 30% de fibra de vidro (PA66-30GF), caracterizando-se mais propriamente as suas temperaturas de fusão e de cristalização e as variações de entalpia (energia libertada ou consumida por estas matérias-primas) ocorridas durante o ensaio.

As variações de entalpia ( $\Delta H$ ) foram calculadas tendo em conta a área dos respetivos picos (endotérmicos ou exotérmicos) (Figura 28) obtidos através de ensaios previamente estabelecidos.

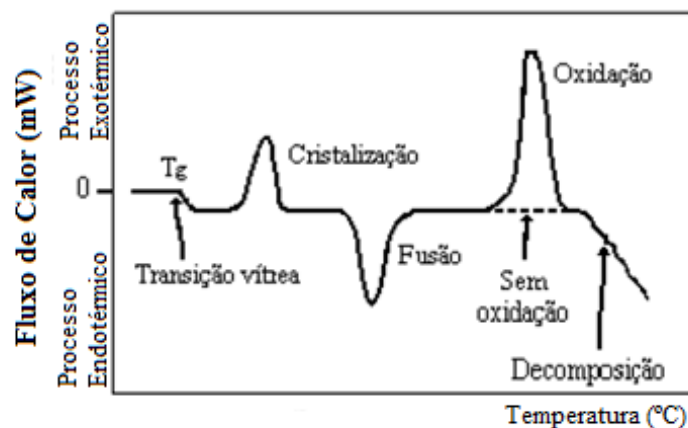


Figura 27 – Registo típico obtido num ensaio de calorimetria diferencial de varrimento com amostra polimérica<sup>60</sup>.

Determinou-se também o grau de cristalinidade de diferentes amostras poliméricas através da razão entre a variação da entalpia associada à fusão das amostras (determinada a partir do registo DSC) e da fusão de uma amostra do polímero 100% cristalino.

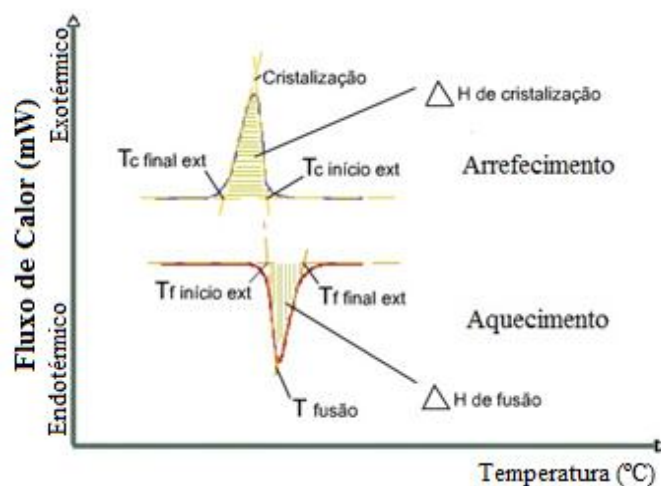


Figura 28 – Curva obtida em ensaio DSC com amostra polimérica, durante o aquecimento (registo inferior) e durante o arrefecimento da mesma amostra (registo superior). No registo de aquecimento / (ou arrefecimento) pode ler-se a temperatura de fusão ( $T_{\text{fusão}}$ ) / (ou de cristalização) do polímero e determinar-se a variação de entalpia associada à sua fusão ( $\Delta H$  de fusão) / (ou  $\Delta H$  de cristalização)<sup>61</sup>.

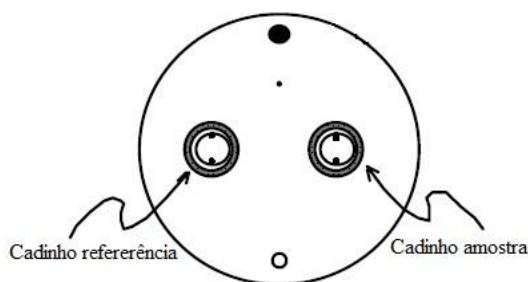
O estudo do POM e da PA66-30GF foram realizados num calorímetro *Shimadzu*, modelo DSC – 60, testando duas amostras para cada polímero. Este equipamento foi assistido pelo





software TA-60, adequado à leitura e tratamento dos dados obtidos para a análise de cada polímero (POM e a PA66-30GF).

Os testes foram conduzidos em atmosfera normal (ar), usando cadinhos selados de alumínio. Usou-se um cadinho vazio como amostra referência. Os dois cadinhos foram colocados na zona de suporte do forno, em paralelo, sobre apoios de platina, como se ilustra na Figura 29.



**Figura 29 – Topo do forno do calorímetro diferencial de varrimento com dois cadinhos sobre suportes de platina<sup>62</sup>.**

Foram realizados quatro ensaios com condições descritas na Tabela XV: dois deles compreenderam amostras de PA66-30GF (ensaio 1: matéria-prima virgem e ensaio 2: matéria-prima reciclada) e os dois restantes envolveram amostras POM, uma delas na condição de polímero virgem e outra na condição de polímero reciclado.

**Tabela XV – Condições do ensaio das curvas DSC para as matérias-primas utilizadas.**

Ensaio		PA66-30GF		POM	
		100% Matéria-prima virgem	100% Matéria-prima reciclada	100% Matéria-prima virgem	100% Matéria-prima reciclada
Peso da amostra (mg)		7,8	7,8	11,8	10,0
Aquecimento	Taxa (°C/min)	10		10	
	°C máximo	300		200	
Arrefecimento	Taxa (°C/min)	-10		-10	
	°C máximo	65		50	

Todas as amostras foram sujeitas a um primeiro ciclo de aquecimento/arrefecimento, até 200 °C no caso do POM e até 300°C no caso da PA, seguindo de arrefecimento até 50°C nos dois casos com a finalidade de eliminar a história térmica dos polímeros. Completado este

primeiro ciclo, iniciou-se o ensaio propriamente dito. As amostras de POM e de PA66-30GF foram então aquecidas a uma taxa de 10°C/min até 200 e 300°C, respetivamente, e, posteriormente arrefecidas à mesma taxa usando azoto líquido como fluido de arrefecimento.

Os ensaios permitiram recolher os dados referentes ao tempo, à temperatura e ao fluxo de calor que permitiu a representação gráfica da variação de fluxo de calor em função da temperatura. Neste tipo de registo foi usado para valores de temperatura de fusão ( $T_f$ ) (curva de aquecimento) e temperatura de cristalização ( $T_c$ ) (curva de arrefecimento).

Calcularam-se igualmente entalpias de cristalização e de fusão (Figura 30) (Equação 2) e ainda do grau de cristalização (Equação 3), entrando em linha de conta com as seguintes relações:

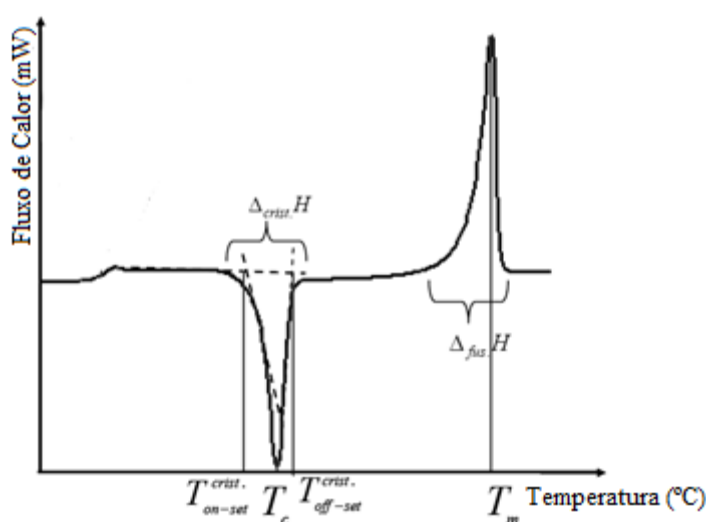


Figura 30 – Ilustração do cálculo das entalpias de cristalização e de fusão a partir do traçado da curva de DSC do polímero<sup>63</sup>. Exemplo: entalpia de fusão [J/g] =  $\Delta H_{\text{fusão}}$  = área tracejada/massa da amostra

$$\Delta H_f = \frac{A}{m \frac{dT}{dt}} \quad (2)$$

Em que  $\Delta H_f$  é a entalpia de fusão,  $A$  é a área subentendida pelo pico [J],  $m$  a massa da amostra [g] e  $\frac{dT}{dt}$  a taxa de aquecimento.

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_t} \times 100 \quad (3)$$

Em que  $X_c$  é o grau de cristalização [%],  $\Delta H_f$  é a entalpia de fusão e  $\Delta H_t$  a entalpia de fusão de uma amostra do polímero 100% cristalino.  $\Delta H_t$  é de 306 J/g para o POM<sup>64</sup> e de 196 J/g para a PA66 sem fibra de vidro<sup>65</sup>.



### 4.2.3 Rugosidade superficial

A rugosidade superficial é classificada como uma medida à frequência da textura superficial da peça. A rugosidade, como será explicado já de seguida, pode ser determinada a partir de vários métodos, no entanto, o conceito é igual para todos, ou seja, através do registo de valores obtidos na frequência faz-se uma análise estatística.

O profilómetro, equipamento utilizado para a medição da rugosidade superficial do elemento superior, é um rugosímetro, com um mostrador digital e um apalpador mecânico (Figura 33), capaz de realizar um varrimento da superfície da amostra, medindo um conjunto de parâmetros caracterizadores da topografia superficial, como  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  e  $P_c$  que seguidamente se explicam.

O parâmetro  **$R_a$** , ou rugosidade média, segundo as normas DIN 4768 e ISO 4287, quantifica a média dos valores de rugosidade medidos relativamente a uma linha média (com posicionamento equidistante relativamente aos pontos de maior rugosidade situados acima e abaixo da linha) ao longo de um comprimento ( $L$ ). Analiticamente, a rugosidade média pode ser determinada pela equação 4 ou pela equação 5<sup>66</sup>:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (4)$$

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (5)$$

Graficamente (Figura 31), a rugosidade média está à média das áreas subentendidas pelo de rugosidade ao longo do comprimento ( $L$ ).

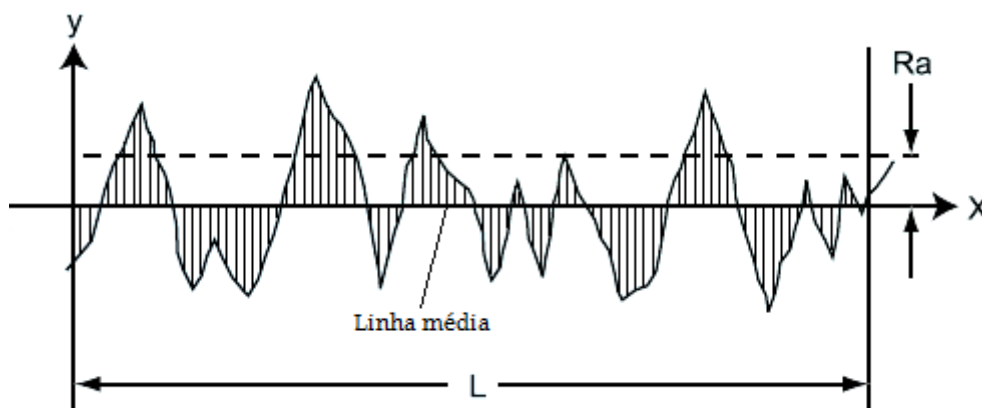


Figura 31 – Rugosidade média expressa graficamente <sup>66</sup>.

O parâmetro **R<sub>z</sub>** (Figura 32), de acordo com a norma DIN 4768, corresponde à média das distâncias entre 5 picos de relevo mais elevado e 5 vales mais profundos, ao longo do comprimento (L), cujo cálculo pode ser efetuado através da equação 6. O **R<sub>z</sub>** representa uma média dos maiores desníveis ou das rugosidades mais profundas<sup>66</sup>.

$$R_z = \frac{R_{y1} + R_{y2} + R_{y3} + R_{y4} + R_{y5}}{5} \quad (6)$$

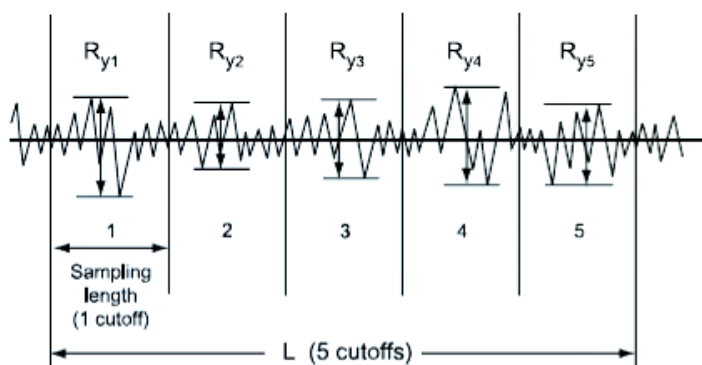


Figura 32 – Determinação de **R<sub>z</sub>** com média das rugosidades mais profundas<sup>66</sup>.

O **R<sub>max</sub>** é o valor máximo obtido ao longo da medição da profundidade da rugosidade, e está abrangido pela norma DIN 4768.

Define-se ainda um parâmetro **P<sub>c</sub>** que quantifica o número de picos da rugosidade ao longo do comprimento.

No presente estudo, determinou-se a rugosidade média (**R<sub>a</sub>**) da superfície do elemento inferior, por ser um dos parâmetros mais utilizados e aceites na quantificação da rugosidade. O elemento inferior deve satisfazer um critério apertado de rugosidade dado que o seu **R<sub>a</sub>** deve situar-se abaixo de 0,1. Utilizou-se um perfilómetro *Mahr*, série M1 (Figura 33), para efetuar varrimentos transversais ao longo de diversas peças.



Figura 33 – Perfilômetro Mahr, série M1<sup>67</sup>.

#### 4.2.4 Análise Microestrutural - Microscópio Eletrônico de Varrimento - MEV (SEM/EDS)

A técnica MEV possui uma elevada profundidade de campo, o que permite focar as amostras em diferentes graus de profundidade. Para além disso, permite obter imagens com elevada resolução da morfologia da superfície da amostra pretendida.

Nesta técnica, uma superfície (amostra-alvo) é exposta a um feixe de eletrões e da interação do feixe com a amostra-alvo resultam vários tipos de radiação e eletrões emitidos, tais como eletrões secundários, eletrões retrodifundidos e os raios-X, que permitem a formação da imagem da amostra-alvo.

Das três matérias-primas referidas neste capítulo, a PA66-30GF foi a mais avaliada por SEM devido à importância que certas características das fibras de vidro têm no comportamento mecânico da peça, designadamente a sua dimensão, orientação e morfologia de superfície. Para caracterizar a fase de reforço da PA66-30GF, realizaram-se ensaios de SEM usando um microscópio eletrónico de varrimento, analítico e de alta resolução de emissão Schottky (SE). Este é um equipamento da marca Hitachi Su-70, com uma voltagem entre os 500V e os 30kV e com detetores de eletrões secundários e retrodispersados (Figura 34).



Figura 34 – Microscópio Hitachi SU-70.

A preparação das amostras para SEM consistiu em recolher as amostras de PA66-30GF da mesma região do componente do rolamento, isto é, da zona de ataque, e sujeitá-las a um polimento com lixas de diferente granulometria (P1000 e P2400). O componente avaliado foi produzido com duas formulações diferentes, isto é, uma delas com 100% de material virgem e outra com 100% de material reciclado.

Depois de preparadas, as amostras foram fixadas num porta-amostras (suporte metálico) com uma cola de carbono, condutora, para melhorar a condutividade do material. Seguidamente repousaram durante cerca de 12 horas, sendo depois recobertas com filme condutor de carbono através do evaporador de carbono, depositado com um evaporador de carbono. Por fim, as amostras foram colocadas e observadas no microscópio, usando ampliações de 1 mm, 500  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2.5 *Análise Mecânica*

##### 4.2.5.1 *Ensaio de Tração*

Para determinar o comportamento dos diferentes materiais realizaram-se ensaios de tração. O procedimento experimental deste ensaio consiste na aplicação de uma força de tração que vai provocar uma deformação na amostra (provete) de um determinado tipo de material, podendo ser realizado até à sua fratura, obtendo posteriormente uma relação entre a tensão e a deformação de forma gráfica. Este tipo de ensaio é considerado um ensaio destrutivo porque



deixa sinais de esforço no provete, tais como, alteração de cor e deformação e/ou fratura, deixando-o completamente inutilizado.

Para estes ensaios foram produzidos, através do processo de injeção, provetes (Figura 35) de dois tipos de materiais (POM e PA66-30GF) em condições de ensaio diferentes (anexos II e III), com o objetivo de testar a tensão máxima fazendo variar a percentagem de matéria-prima virgem e a percentagem de reciclado (Tabela XVI).



Figura 35 – Provetes produzidos na *Moldoeste II*.

Tabela XVI – Condições pré-estabelecidas ao POM e à PA66-30GF para a realização de ensaios de tração.

Provetes de POM			Provetes de PA66-30GF		
Aditivo utilizado	Composição		Aditivo utilizado	Composição	
	Reciclado	Virgem		Reciclado	Virgem
2%	0%	100%	Não apresenta aditivo na sua composição	0%	100%
2%	100%	0%		100%	0%
2%	20%	80%		20%	80%
2%	40%	60%		40%	60%
1%	50%	50%		50%	50%
1,5%					
2%					
1%	60%	40%		60%	40%
1,5%					
2%					
2%	80%	20%		80%	20%



Nos ensaios de tração pretende-se avaliar a resistência mecânica do material variando a percentagem de aditivo, um constituinte especial para pigmentação e melhoramento das propriedades lubrificantes. Este aditivo foi aplicado no elemento inferior do rolamento, produzido por 98% de POM e 2% de um aditivo preto, devido à interação que existe entre o elemento inferior e o anel. Esta variação de aditivo pode ser observada na

Tabela XVI. No entanto, é de salientar que esta variação só é feita no material novo, ou seja, no que é reciclado (50% num e 40% no outro) mantém-se com 2% de aditivo, uma vez que esse já estava incorporado no reciclado.

Foram escolhidas estas duas composições porque são as que estão no limite para a produção do rolamento, 50% de máximo para o reciclado.

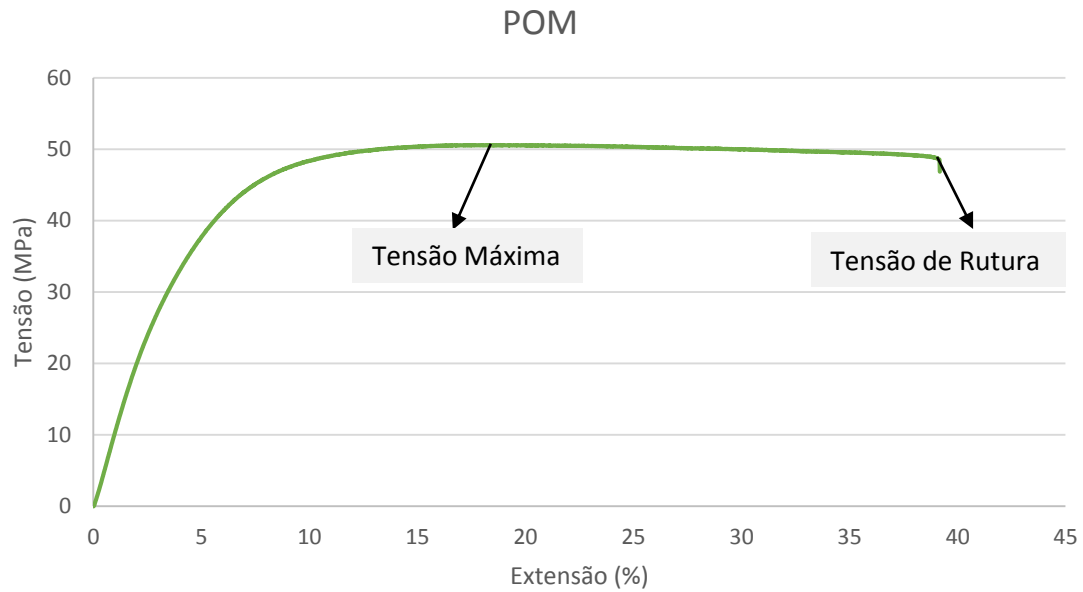
Os ensaios de tração uniaxial das amostras acima mencionadas realizaram-se na máquina *AG-IS Autograph* da *Skimadzu*. Esta máquina, por ser universal, está preparada para realizar diferentes ensaios em diferentes materiais, estipulando previamente a velocidade.

Para além deste equipamento, recorreu-se também a um *software*, o *TRAPEZIUM2*, de modo a observar e avaliar os dados obtidos no decorrer do ensaio. Para este caso em específico, os ensaios foram realizados à temperatura ambiente de forma a alongá-los através de uma força uniaxial e a uma velocidade constante (5 mm/min para as composições de POM e 10 mm/min para as composições de PA66-30GF) durante um determinado intervalo de tempo, registando a força, o percurso e o tempo.

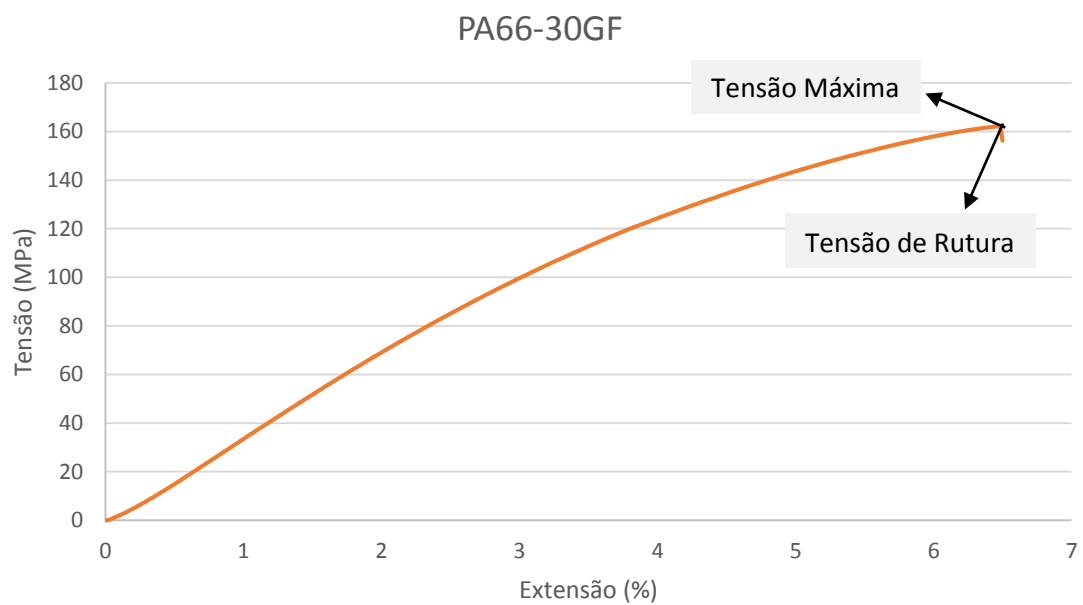
Foram sujeitos a ensaios de tração provetes de POM e PA66-30GF, nos quais se fez variar a percentagem de reciclado, de matéria-prima virgem e, no caso do POM, de aditivo.

Como foi referido anteriormente, os resultados obtidos foram a força, o percurso e o tempo, pelo que foi necessário tratar estes valores de forma a obter um gráfico tensão-extensão, convertendo a força em tensão nominal ( $\sigma_n$ ) e o percurso em extensão nominal ( $\epsilon_n$ ). Na Figura 36 é possível observar um exemplo do gráfico obtido durante os ensaios do POM, e na Figura 37 é possível obter um gráfico da PA66-30GF, também obtida durante os ensaios de tração.





**Figura 36 – Gráfico tensão-extensão do POM.**



**Figura 37 – Gráfico tensão extensão da PA66-30GF.**

A  $\sigma_n$  (equação 7) traduz o valor de carga ou força ( $F$ ) aplicada no provete num determinado ponto por unidade de área inicial do provete ( $A_0$ ), medida por um paquímetro digital.



$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \quad (7)$$

A  $\varepsilon_n$  (equação 8) é o quociente da variação do comprimento do provete segundo a direção de tração ( $\Delta l$ ) e o comprimento inicial do provete ( $l_0$ ).

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (8)$$

onde  $\Delta l$  é a variação do comprimento do provete ao longo do tempo (equação 9).

$$\Delta l = l - l_0 \quad (9)$$

A  $\varepsilon_n$  pode ainda ser expressa em forma percentual, ou seja, extensão nominal percentual ( $\varepsilon_n\%$ ) (equação 10).

$$\varepsilon_n\% = \varepsilon_n \times 100 \quad (10)$$

#### 4.2.5.2 *Momento de torção ou Torque*

Quando um rolamento está em funcionamento fica sujeito a uma carga que provoca rotação em torno de um ponto – momento de torção ou torque. Durante este processo o momento é positivo quando a força provoca um movimento no sentido horário e negativo quando a força provoca um movimento no sentido anti-horário.

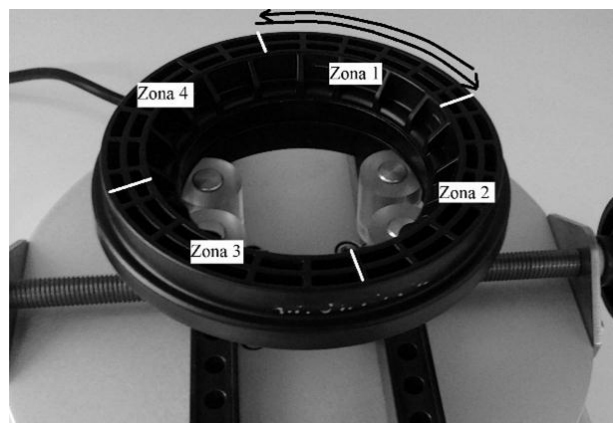
As unidades do Sistema Internacional (SI) para o torque são Newton Metro (N.m).

O equipamento utilizado nesta determinação experimental é da IMADA, um *Screw-cap Tester*, modelo *DTX2-10N-A* (Figura 38). Apresenta dois modos de funcionamento, o “modo pico” que captura o valor do torque máximo medido num determinado intervalo de tempo e o “modo de tempo real” que captura e memoriza todos os valores medidos num determinado intervalo de tempo<sup>68</sup>, sendo este o utilizado na presente dissertação.



**Figura 38 – Screw-cap Tester, modelo DTX2-10N-A<sup>68</sup>.**

O procedimento usado consiste na colocação e fixação de um rolamento preso em quatro apoios e testá-lo em 4 zonas diferentes. Os testes foram efetuados nos sentidos horário e anti-horário (Figura 39), registrando todos os valores informaticamente.



**Figura 39 – Fixação do rolamento no ensaio para determinação de torque.**



# Capítulo 5

## Resultados

## 5.1 POM

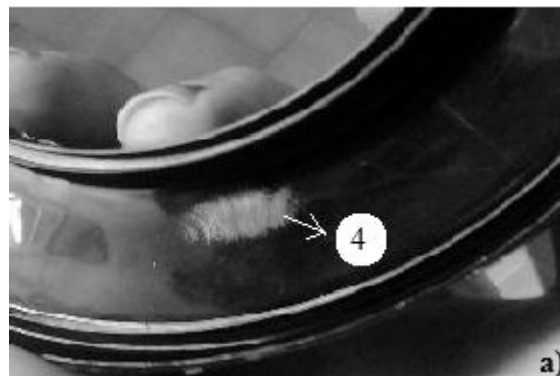
### 5.1.1 Características mecânicas do elemento do rolamento em POM

O elemento superior do rolamento é composto por POM e é o elemento que mais desgasta sofre durante o funcionamento. Quando um rolamento é sujeito a um regime austero ou limite, as interfaces dos materiais em contacto podem aderir uma à outra, impedindo o seu movimento relativo (gripagem), resultando, assim, no aumento de atrito. Este tipo de falha pode ocorrer devido à falta de lubrificação ou devido a características superficiais desapropriadas dos componentes.

Para aprofundar a caracterização do funcionamento deste tipo de rolamentos, analisou-se a rugosidade superficial em regiões distintas do elemento superior, isto é, em regiões isentas de defeitos visuais aparentes (ensaio 1 a 3 na Tabela XVII), e em regiões com imperfeições visíveis a olho nu (região/ ensaio assinalados com o número 4 na Figura 40 e na Tabela XVII).

**Tabela XVII – Valores médios da rugosidade superficial (Ra)**

	Valores médios
	Ra ( $\mu\text{m}$ )
Ensaio 1	0,043
Ensaio 2	0,037
Ensaio 3	0,036
Ensaio 4	0,388



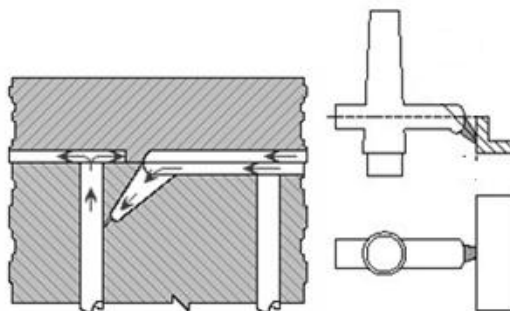
**Figura 40 – Exemplos do tipo de imperfeição superficial detetada no elemento superior.**

Com base nos resultados obtidos (Tabela XVII), constatou-se que a rugosidade superficial é bastante baixa em zonas em que não existem imperfeições e bastante elevada em zonas próximas do ponto de injeção, isto é, zonas onde se registam as imperfeições, atingindo neste caso valores de Ra superiores a  $0,1 \mu\text{m}$ , valor este que traduz o máximo permitido a Ra. Estes valores elevados contribuem para aumentar o coeficiente de atrito e por conseguinte afetam o desempenho mecânico final do rolamento.

Numa tentativa de prolongar a vida útil do rolamento e, consequentemente, conseguir uma diminuição do coeficiente de atrito, realizaram-se alterações ao molde do elemento superior. Destas alterações resultou o seguinte: melhoria (polimentos) das paredes dos canais e



quinas ativas, de modo a minimizar obstáculos à passagem do plástico fundido; a injeção do tipo submarina (Figura 41), devido ao número de cavidades que o molde apresenta e às dimensões e limitações da peça, foi melhorada, colocando-a numa zona mais estratégica, onde exista à sua frente uma parede polida, de forma a distribuir o plástico por toda a cavidade; por último, avaliou-se também, a alteração dos parâmetros de injeção, mais propriamente a velocidade de injeção, que se aumentou de 10 para 15 mm/s, levando ao aumento da pressão de injeção em cerca de 100 bar, por forma a eliminar essas imperfeições na superfície.

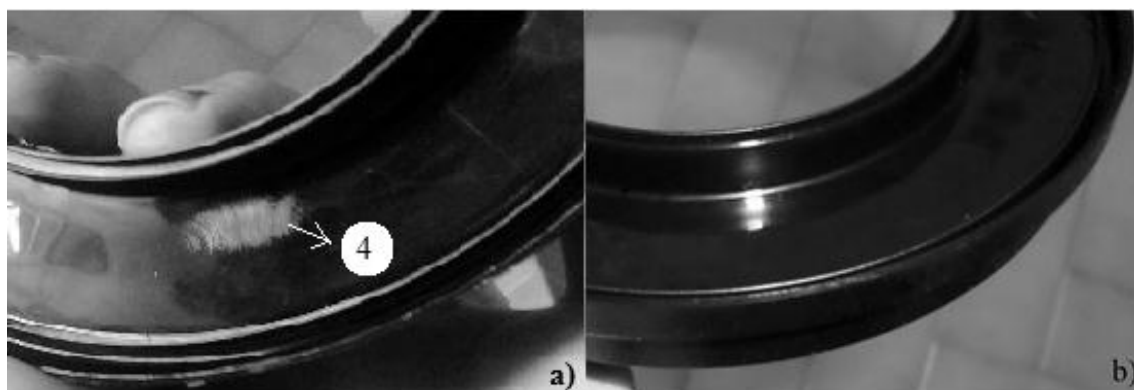


**Figura 41 – Injeção submarina<sup>69</sup>.**

Com as alterações conjuntas, no molde e no processo de injeção, foi possível obter moldações em que nenhuma das cavidades apresentou as referidas imperfeições na zona do ponto de injeção (Figura 42 b)). A re-avaliação da rugosidade superficial do elemento moldado nas novas condições permitiu concluir que os novos valores de rugosidade, apresentados na Tabela XVIII, se situam dentro da gama de valores permitida, isto é,  $R_a$  menor que  $0,1 \mu\text{m}$ .

**Tabela XVIII – Comparação dos valores de rugosidade média ( $R_a$ ) medidos antes e depois das alterações impostas ao molde e ao processo de injeção.**

	Valores médios	Valores médios 1
	$R_a (\mu\text{m})$	$R_a (\mu\text{m})$
Ensaio 1	0,043	0,050
Ensaio 2	0,037	0,034
Ensaio 3	0,036	0,040
Ensaio 4	0,388	0,032

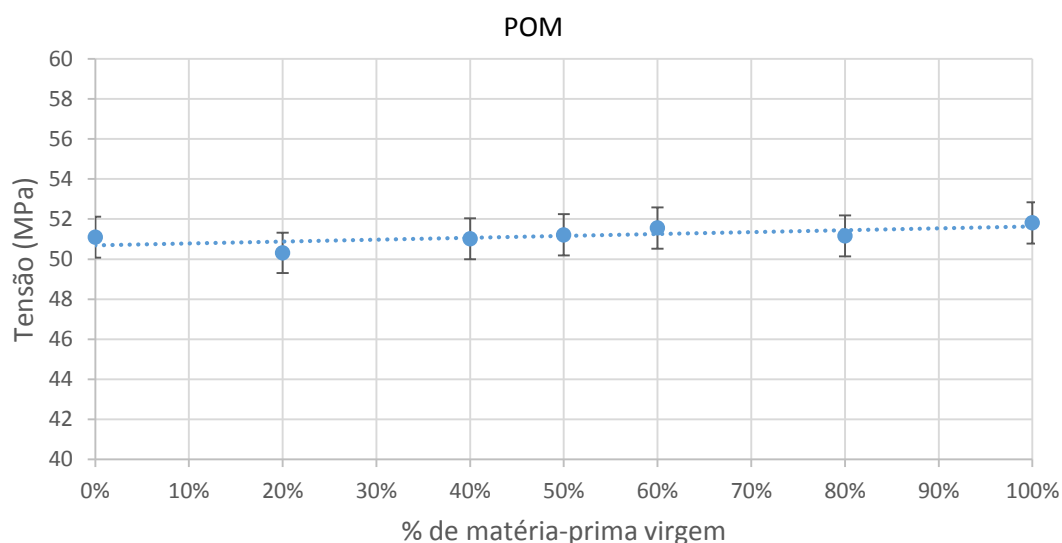


**Figura 42 – a) exemplo do tipo de imperfeição superficial detetada no elemento superior; b) exemplo da nova produção dos elementos superiores com as novas alterações e isenta de imperfeições.**

Ainda no contexto do comportamento mecânico do rolamento e atendendo ao facto de a Moldoeste II incorporar reciclado nas suas formulações, procedeu-se à caracterização mecânica das composições com reciclado através de ensaios de tração-deformação com o intuito de perceber se a presença de reciclado iria influenciar a resistência mecânica do elemento, ou se alteraria as propriedades físicas do material, prejudicando a propriedade lubrificante.

Assim, os resultados de caracterização mecânica referentes às composições com diferentes teores de reciclado, composições essas já identificadas na

Tabela XVI mostram que a adição de reciclado à matéria-prima POM não tem influência expressiva no valor da tensão máxima suportada pelo elementos tal como se depreende na Figura 43 onde se ilustra a variação da tensão máxima com o aumento de teor de reciclado adicionado.

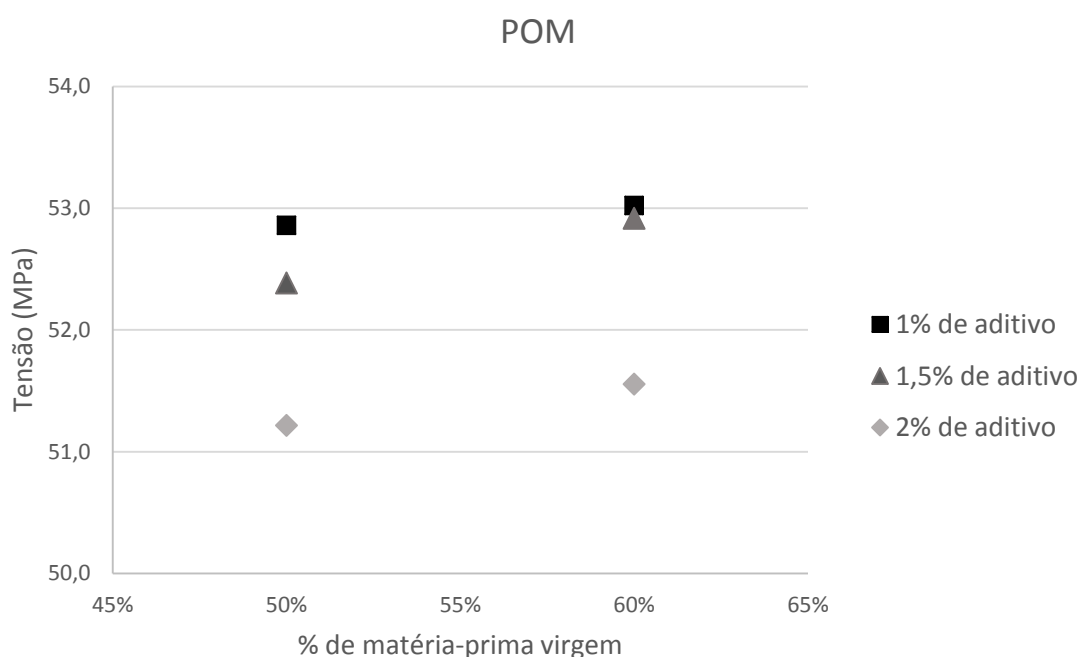






**Figura 43 – Variação da tensão máxima registada em ensaios de tração-deformação com amostras de POM adicionadas com diferentes teores de reciclado. A tensão máxima mantém-se na gama de valores 50 a 52 MPa quando o teor de reciclado varia entre 0 e 100%.**

Tendo em consideração que as formulações com POM contêm um importante aditivo com papel de lubrificante e, no sentido de avaliar o seu potencial impacto no comportamento mecânico do elemento, procedeu-se à alteração da percentagem de aditivo no POM e à sua subsequente caracterização mecânica. Os resultados obtidos para as formulações em que o teor de aditivo se variou entre 1 e 2% podem ser analisados na Figura 44.

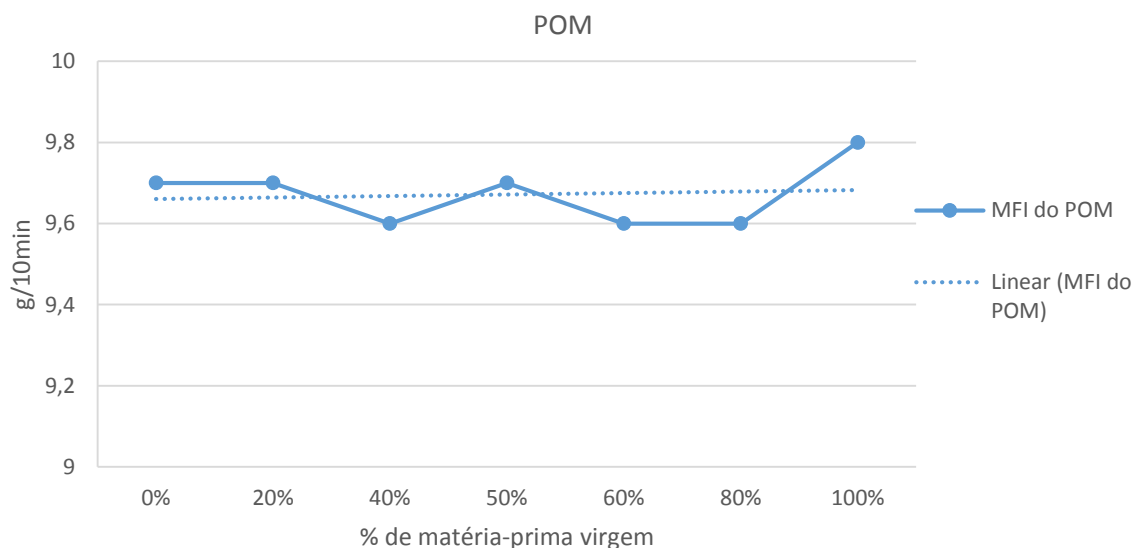


**Figura 44 – Variação da tensão máxima registada em ensaios de tração-deformação com amostras de POM adicionadas com diferentes teores de aditivo. A variação do teor de aditivo afeta a tensão máxima, observando-se a sua diminuição com o aumento da quantidade de aditivo.**

Embora o impacto da tensão máxima com a alteração do teor de aditivo não detenha uma variação acentuada, ela está manifestada, contribuindo negativamente para a diminuição da tensão máxima com o aumento do teor de aditivo de 1 para 2%. Esta variação conjugada com a elevada percentagem de reciclado é uma condição desfavorável para esta propriedade.

### 5.1.2 Comportamento reológico do POM

Para se caracterizar o comportamento reológico do POM adicionado com diferentes teores de reciclado procedeu-se à realização de ensaios MFI cujos resultados se apresentam na Figura 45. É possível observar que o valor de MFI à medida que o teor de reciclado varia, o valor de MFI não sofre variações significativas, apresentando apenas pequenas oscilações em torno de um valor médio de 9,66 g/10min.

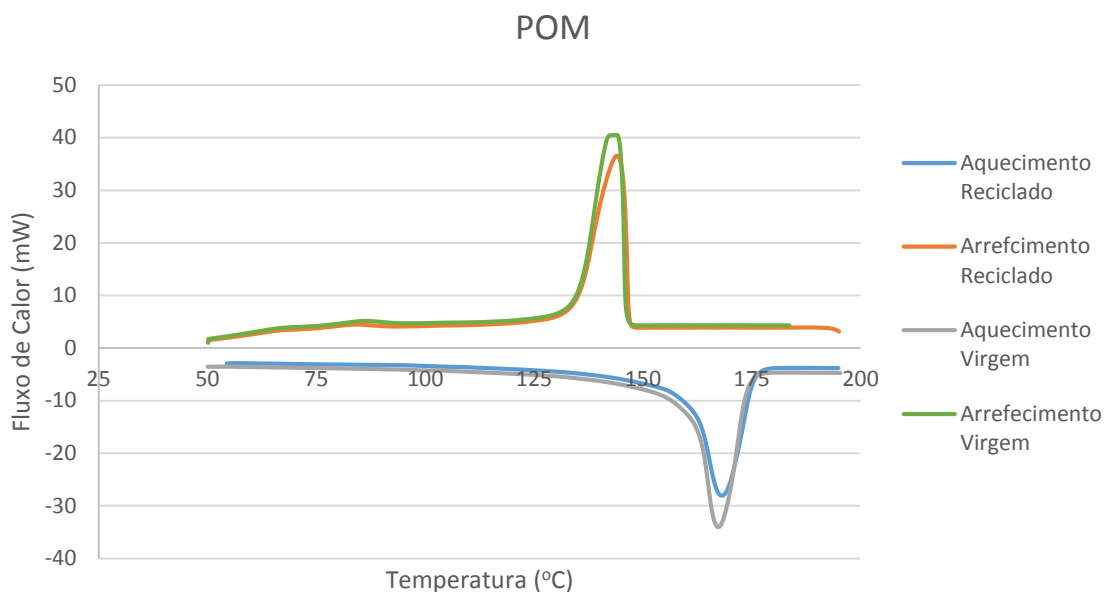


**Figura 45 – Variação do MFI com o aumento do teor de reciclado de formulações no POM.**

Estes resultados indicam que o POM não é particularmente vulnerável aos ciclos de reprocessamento, preservando globalmente as suas propriedades de viscosidade, o que indicia que a sua estrutura molecular é pouco vulnerável às condições em que é repetidamente processado.

### 5.1.3 Comportamento térmico do POM

Na Figura 46 é possível observar os resultados (curvas DSC) obtidos durante os ensaios de caracterização de comportamento térmico do POM.



**Figura 46 – Curvas DSC do POM 100% reciclado e 100% virgem, sujeitos a taxas de aquecimento e arrefecimento de 10°C/ min.**

Com base na análise térmica DSC das amostras do POM foram determinadas as: temperaturas de cristalização ( $T_c$ ), temperaturas de fusão ( $T_f$ ), variações da entalpia de cristalização ( $\Delta H_c$ ), variações da entalpia de fusão ( $\Delta H_f$ ) e os graus de cristalização para as duas composições do POM, isto é, POM 100% virgem e POM 100% reciclado (Tabela XIX). Como se pode concluir os valores em análise não acusam um efeito significativo da variação do teor de reciclado na formulação.

**Tabela XIX – Valores de temperaturas e de entalpia de fusão ( $T_f$  (°C) e  $\Delta H_f$  (J/g), respetivamente) e de temperaturas e de entalpia de cristalização ( $T_c$  (°C) e  $\Delta H_c$  (J/g), respetivamente), bem como grau de cristalinidade ( $X_{cf}$  (%)) de formulações de POM virgem e reciclado – valores determinados com base nas curvas DSC apresentadas na Figura 46.**

Material		$T_f$ (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_c$ (J/g)	Grau de Cristalinidade – $X_{cf}$ - (%)
POM	Reciclado	168	229,48	144	- 187,30	74,99
	Virgem	167	245,44	144	- 204,56	80,21

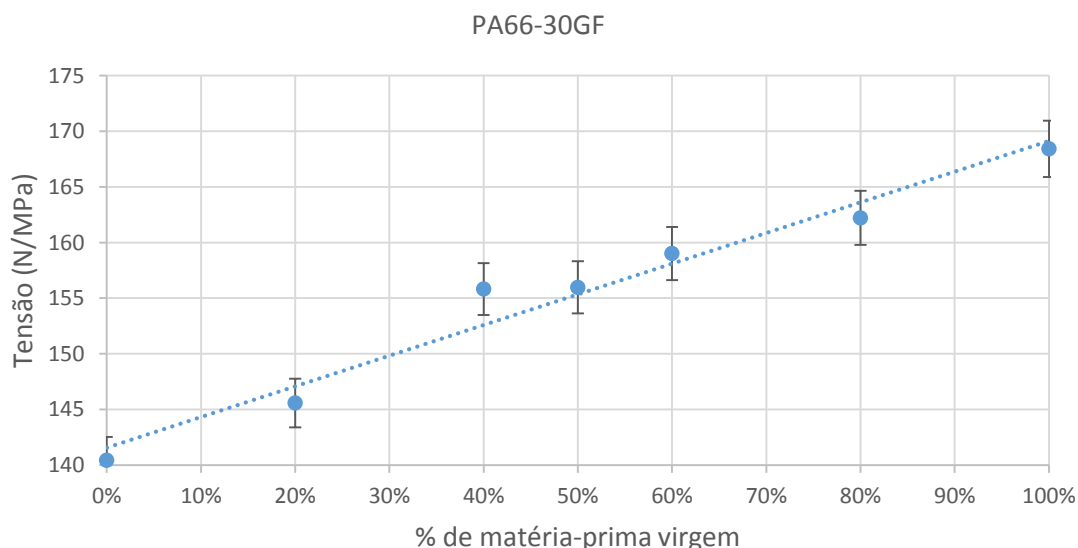
## 5.2 PA66-30GF

### 5.2.1 Comportamento mecânico do elemento do rolamento com PA66-30GF

A PA66-30GF é a matéria-prima que garante a resistência mecânica do rolamento de forma a suportar a carga exercida pelo amortecedor, mantendo a sua funcionalidade operacional. Tal como na matéria-prima usada no fabrico do elemento superior esta também apresenta reciclado na sua composição, pelo que, à semelhança do efetuado com o elemento inferior, também se analisou a variação do comportamento mecânico deste elemento em função da percentagem de reciclado.

Os resultados obtidos, referentes às diferentes composições anteriormente apresentadas na

Tabela XVI, apresentam-se na forma gráfica Figura 47. Como pode observar-se, a figura revela que a presença de reciclada influencia a resistência mecânica do produto final, ou seja, quando se aumento o teor de reciclado incorporado na formulação, penaliza-se a tensão máxima do produto; neste caso a substituição integral de matéria-prima virgem por reciclado acarretaria uma diminuição da tensão máxima em cerca de 18%.



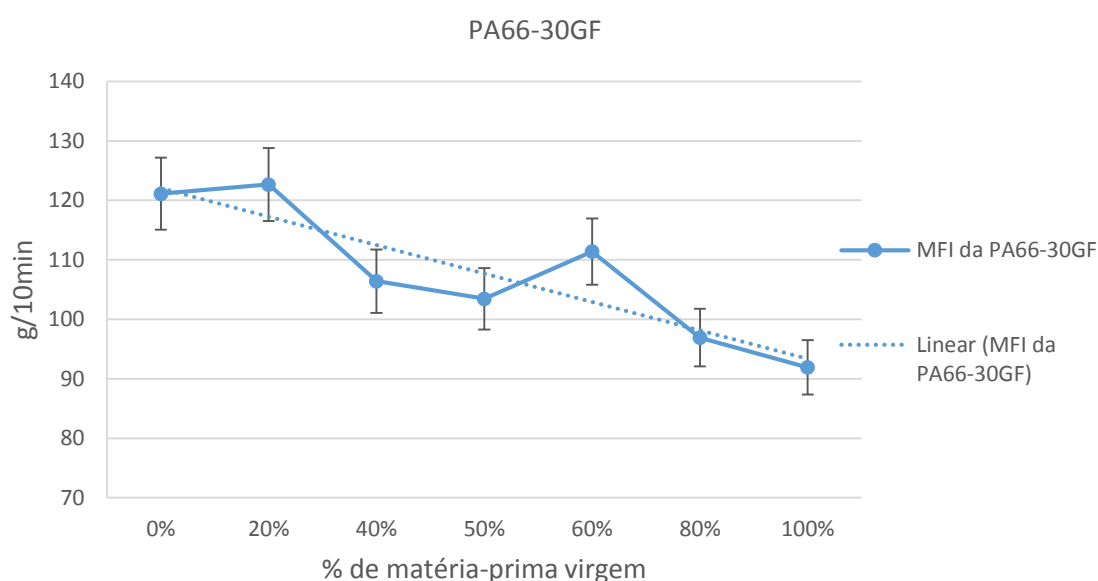
**Figura 47 – Variação da tensão máxima registada em ensaios de tração-deformação com amostras de PA66-30GF adicionadas com diferentes teores de reciclado. A tensão máxima tende a aumentar quando o teor de reciclado varia entre 0 e 100%.**



Uma vez que a incorporação de reciclado influencia as propriedades mecânicas, e a fim de se estudar este problema, realizaram-se ensaios reológicos, ensaios térmicos e ensaios de SEM, cujos resultados se apresentam nas secções que se seguem.

### 5.2.2 Comportamento reológico PA66-30GF

Os resultados obtidos com a realização de ensaios MFI estão apresentados sob forma gráfica na Figura 48. Verificou-se um aumento da viscosidade com o aumento da percentagem de incorporação da matéria-prima virgem e, por consequência, pode-se inferir que o peso molecular da formulação tende a aumentar.

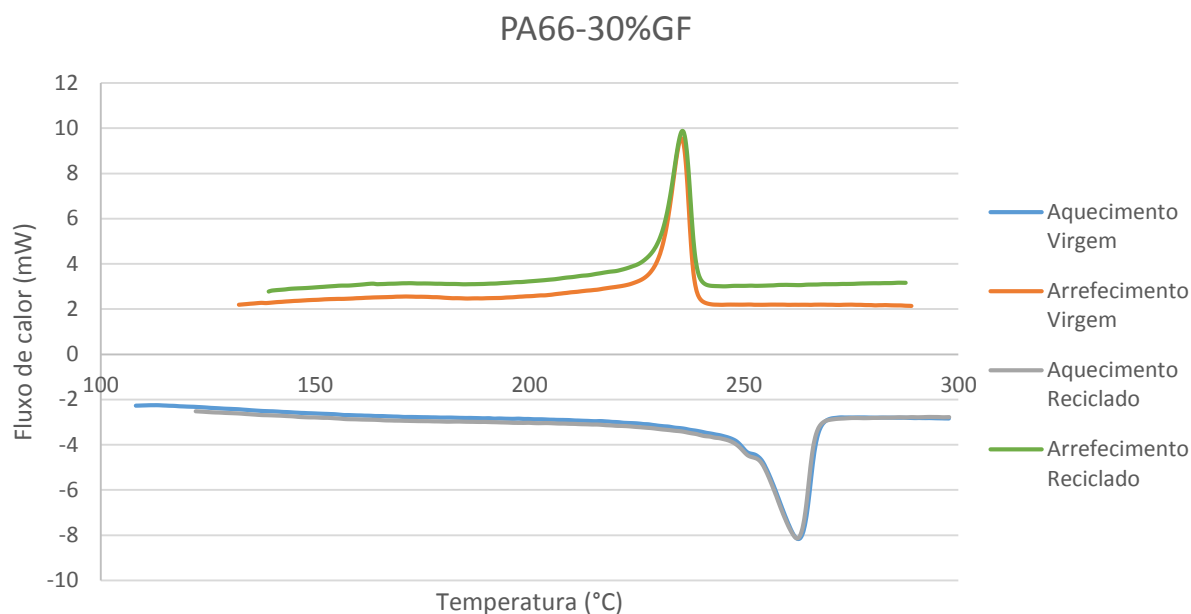


**Figura 48 – Variação do MFI com o aumento do teor de reciclado de formulações na PA66-30GF.**

Apesar da determinação do MFI ser uma técnica de caracterização bastante utilizada na indústria, esta técnica apenas deve ser utilizada para polímeros e não para compósitos como é o caso desta matéria-prima. Assim, deve-se acautelar a interpretação dos resultados obtidos por esta técnica visto que o polímero contém 30% de fibras de vidro, havendo a possibilidade destas influenciarem o comportamento do na fiação.

### 5.2.3 Comportamento térmico da PA66-30GF

A fim de se analisar a possibilidade da degradação do polímero, efetuou-se uma análise de DSC, obtendo-se o gráfico apresentado na Figura 49.



**Figura 49 – Curvas DSC da PA66-30GF 100% reciclado e 100% virgem, sujeita a uma taxa de aquecimento e arrefecimento de 10°C/ min.**

Deteta-se, na curva de aquecimento, que a fusão do polímero se traduz na presença dois acidentes de diferentes intensidades, isto é, um ombro de cerca de 251,68 °C seguido de um pico a 262,67 °C. A presença destes dois acidentes assinalados a diferentes temperaturas pode refletir a existência de duas espécies de cristais com espessuras de lamelas diferentes ou uma possível recristalização<sup>70</sup>. É ainda possível constatar que durante o arrefecimento as linhas base não coincidem. No entanto, essa variação não afeta a posição ou forma do pico de cristalização, indicando que o polímero não sofreu qualquer alteração estrutural significativa.

Da análise do gráfico, e utilizando a metodologia já descrita, foi possível obter os resultados referentes a temperaturas e entalpias de fusão ou de cristalização bem como graus de cristalinidade, que estão expressos na Tabela XX. Da análise da tabela conclui-se que a alteração do teor de reciclado na formulação não se reflete em variações significativas destes parâmetros.



Tabela XX – Valores de temperaturas e de entalpia de fusão ( $T_f$  (°C) e  $\Delta H_f$  (J/g, respetivamente) e de temperaturas e de entalpia de cristalização ( $T_c$  (°C) e  $\Delta H_c$  (J/g), respetivamente), bem como graus de cristalinidade ( $X_{cf}$  (%)) de formulações de PA66-30GF virgem e reciclado – valores determinados com base nas curvas DSC apresentadas na Figura 49.

Material		$T_f$ (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_c$ (J/g)	Grau de Cristalinidade – $X_{cf}$ - (%)
PA66-30GF	Reciclado	263	78,75	234	- 80,83	40,18
	Virgem	263	78,86	235	- 83,74	40,23

#### 5.2.4 Análise microestrutural da PA66-30GF

A análise microestrutural desta matéria-prima (Figura 50 e Figura 51) revela que as amostras com 100% de material virgem apresentam uma matriz polimérica bastante homogénea, com uma boa adesão relativamente às fibras, revestindo com uma camada superficial irregular que as protege e torna mais volumosas (Figura 51), não se detetando aparentes ruturas ao longo do seu comprimento.

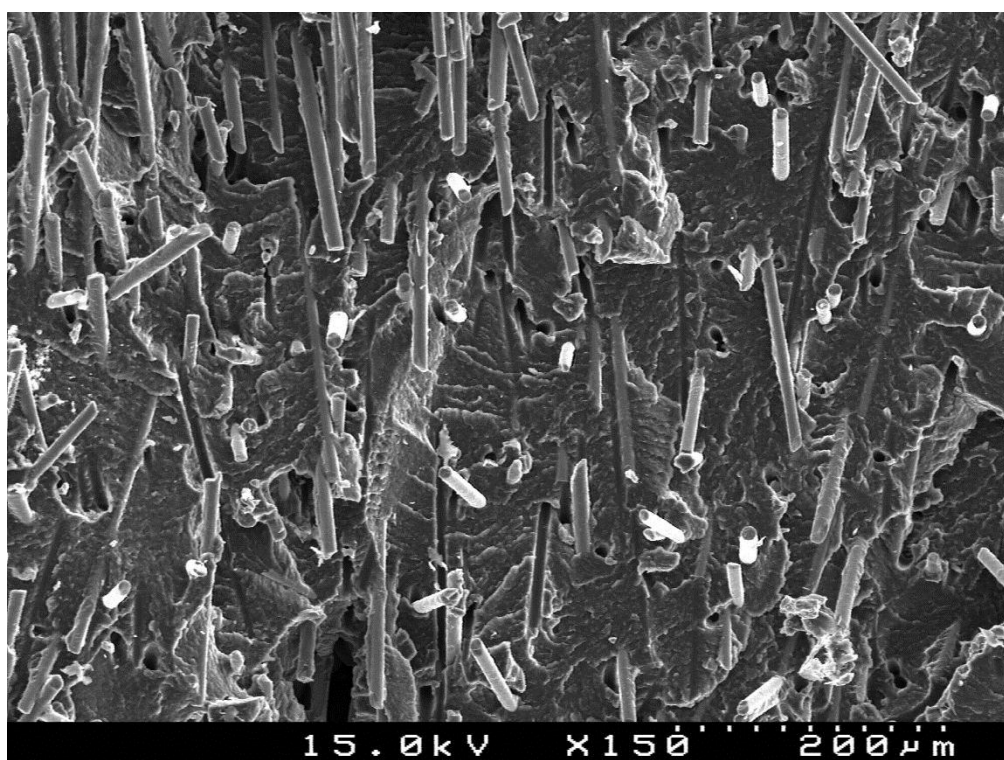
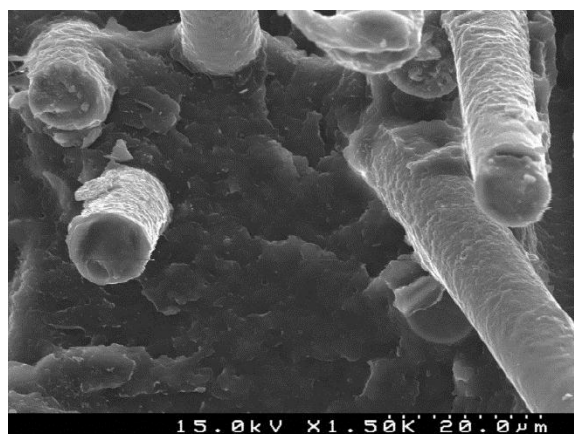


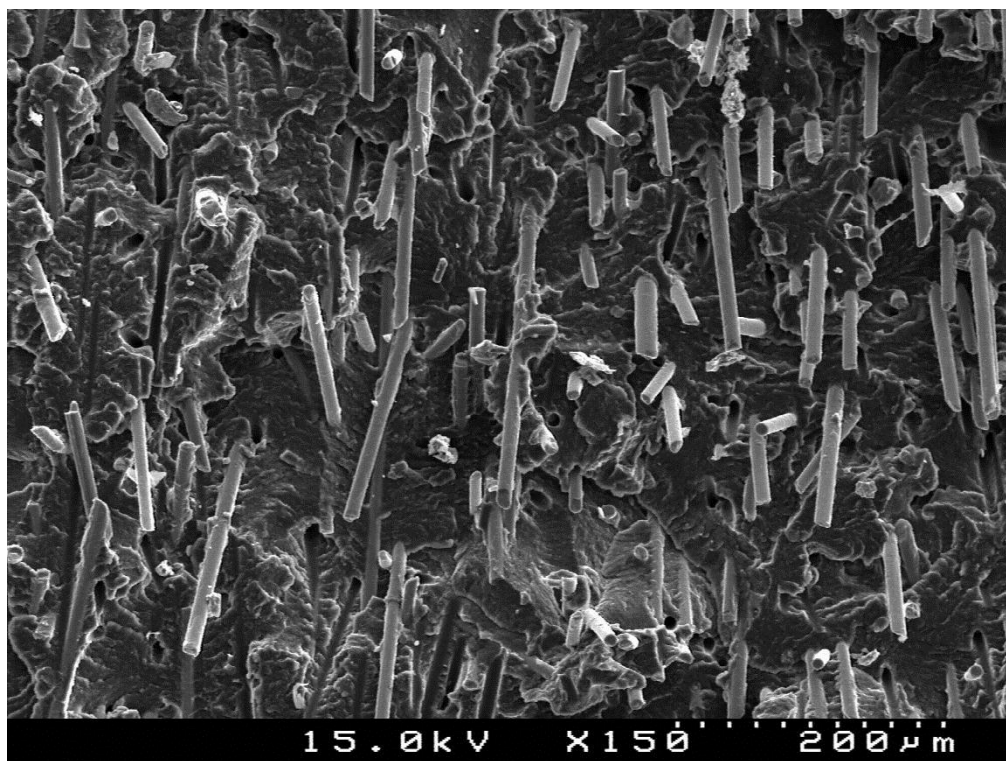
Figura 50 – Micrografia obtida através do ensaio de SEM relativamente à amostra 100% virgem com uma ampliação de 200  $\mu\text{m}$ .





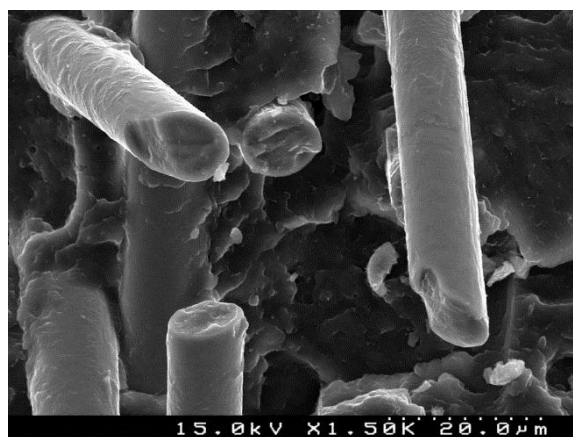
**Figura 51 – Micrografia obtida através do ensaio de SEM relativamente à amostra 100% virgem com uma ampliação de 20  $\mu\text{m}$ .**

Porém na Figura 52 e na Figura 53, onde se exibem as micrografias de SEM obtidas com amostras com 100% de material reciclado, é possível verificar que a matriz polimérica se encontra menos homogênea exibindo pouca aderência relativamente às fibras cuja superfície se apresenta “mais lisa”, ou seja, com revestimento de menor espessura e menos rugoso do que o observado no caso do polímero virgem. A pouca aderência faz com que as fibras de vidro aparentem ser simples “tubos”, mais facilmente destacáveis da matriz do que no caso anterior; por outro lado encontram-se por vezes fibras partidas.



**Figura 52 – Micrografia obtida através do ensaio de SEM relativamente à amostra 100% reciclada com uma ampliação de 200  $\mu\text{m}$ .**



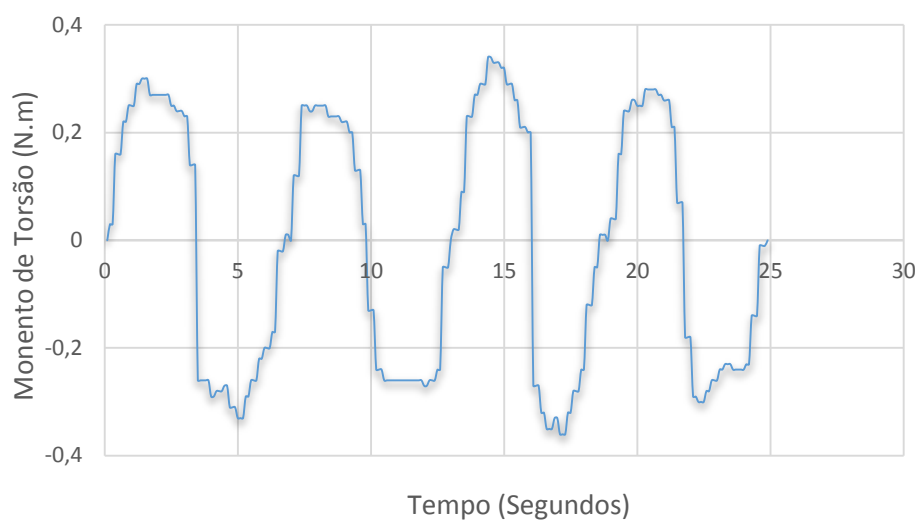


**Figura 53 – Micrografia obtida através do ensaio de SEM relativamente à amostra 100% reciclada com uma ampliação de 20 µm**

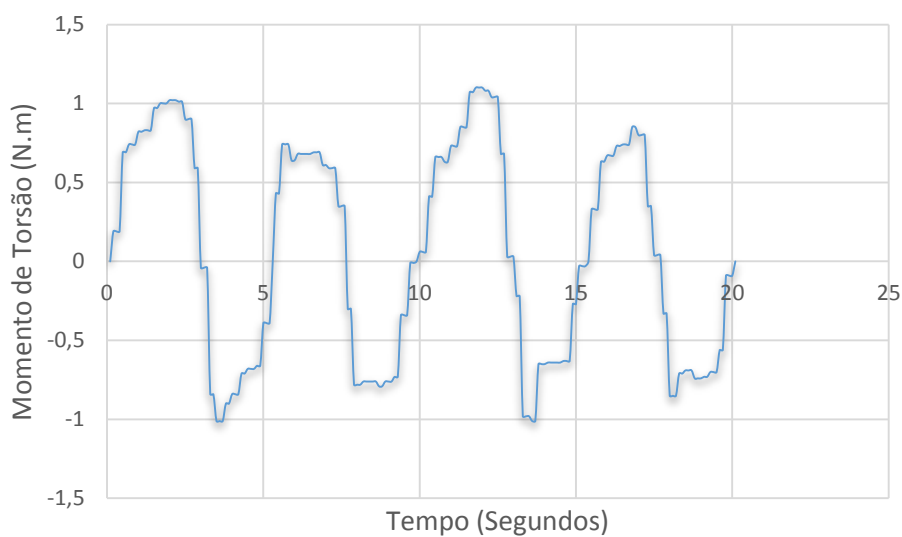
### 5.3 Comportamento do rolamento polimérico

Conforme já foi referido neste relatório, os rolamentos são testados pelos operadores da Moldoeste II de uma forma manual e empírica, ou seja, avaliando a facilidade de deslizamento, quando um dos elementos em movimento de rotação se desloca relativamente ao outro, e classificando o comportamento do rolamento como “go” ou “no go”. Tendo este facto em linha de conta e, propondo melhorar a eficiência dos operadores de modo a rentabilizar o seu tempo, foi feito um teste aos rolamentos com vista a identificar uma situação/valor limite partir do qual o rolamento é classificado como “no go”. Este valor limite foi determinado através de um estudo feito com os operadores em que se seleccionou um conjunto de rolamentos (constituídos por rolamentos dentro de especificações (“go”) e fora de especificações (“no-go”) e se pediu aos operadores que classificassem o conjunto de rolamentos. Uma vez registadas as classificações relativamente a determinados rolamentos, estes foram testados em ensaios de torque, definindo-se um valor limite tendo em conta os resultados obtidos.

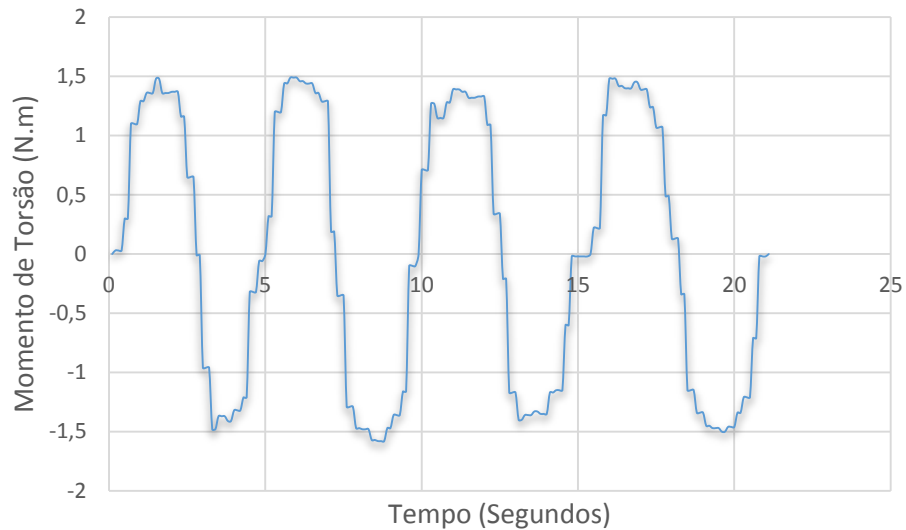
Os resultados estão expressos na Figura 54, Figura 55 e Figura 56.



**Figura 54 – Determinação do torque em rolamentos considerados dentro de especificações (“go”).**



**Figura 55 – Determinação do torque em rolamentos considerados no limite das especificações (“go” ou “no-go”).**



**Figura 56 – Determinação do torque em rolamentos considerados fora de especificações (“no-go”).**

Como é possível verificar nas figuras, o momento de torsão de cerca de 1 N.m é o valor que define a barreira do “go” ou “no-go”. Todos os rolamentos com valores com um momento de torsão abaixo deste limite estão prontos a serem embalados, ao passo que aqueles que apresentam valores acima desse limite não serão aprovados para funcionamento.



## Capítulo 6

# Discussão de Resultados

## 6.1 Comportamento mecânico, reológico e térmico do POM

O POM, como já foi referido neste trabalho, apresenta como principais características elevada rigidez, boa resistência mecânica, resistência à deformação e baixo coeficiente de atrito, razões pelas quais é um dos materiais usados para a estrutura funcional do rolamento, nomeadamente no elemento superior.

Como a formulação do POM contém uma determinada percentagem de POM reciclado, considerou-se importante avaliar o impacto da presença de reciclado no seu comportamento térmico e propriedades mecânicas. A partir das composições pré-estabelecidas (nas quais se variou o teor de reciclado), foi possível verificar que, tal como se ilustrou na Figura 43, a tensão máxima é pouco afetada pelo aumento do teor de reciclado na composição, mantendo o seu valor no intervalo 50 a 52 MPa, mesmo na situação limite de a formulação ser inteiramente composta por reciclado. Isto significa que, apesar do POM reciclado ser sujeito a vários ciclos de fusão associados ao reprocessamento, a sua resistência mecânica mantém-se praticamente inalterada o que parece indicar que este polímero não se degrada significativamente durante os sucessivos ciclos térmicos do seu reprocessamento.

Uma vez que este elemento do rolamento (elemento superior), também incorpora na sua formulação 2% de um importante aditivo que lhe confere a pigmentação e propriedades lubrificantes, entendeu-se ser de interesse no contexto do presente estudo avaliar o efeito do próprio aditivo no comportamento mecânico do POM. Os resultados obtidos, apresentados na Figura 44 para formulações com 40 e 50% de reciclado, demonstram que a presença de aditivo afeta a tensão máxima: pequenos incrementos do teor de aditivo, da ordem de 0,5% induzem decréscimos da tensão máxima que, embora pequenos, são observados de forma consistente. É sabido que o poliacetal da BASF sem aditivo apresenta uma resistência que ronda os 63 MPa<sup>24</sup>, valor este superior ao do POM aditivado. Esta observação está por conseguinte em linha com os resultados expressos na Figura 44, confirmando assim a tendência de que o aumento do teor de aditivo diminui a resistência do polímero.

Em termos de comportamento reológico, os resultados referentes ao índice de fluidez em função do teor de reciclado (Figura 45) indicaram que a viscosidade permanece estável, num intervalo de 9,6 a 9,8 g/10min, independentemente da variação da quantidade de reciclado incorporado na formulação. Estes resultados confirmam assim que a valor de MFI não se altera significativamente quando substituímos matéria-prima virgem por matéria-prima reciclada.



O comportamento térmico das amostras de POM traduzido pelas respectivas curvas DSC (Figura 46) evidencia um pico associado à fusão e outra à cristalização. Os resultados expressos na Tabela XIX indicam também que o material virgem e o reciclado apresentam temperaturas de fusão e de cristalização próximas, 167-168 °C e 144°C, respetivamente. Relativamente às variações energéticas, e tendo em conta a massa de cada amostra, a amostra constituída por material reciclado é aquela à qual estão associadas maiores quantidades de energia, tanto na fusão como na recristalização, devido ao rearranjo das cadeias moleculares que estão mais repartidas com o reprocessamento. Nota-se porém que as entalpias específicas de fusão e de cristalização que se determinaram para a matéria-prima virgem (245,44 J/g e -204,56 J/g, respetivamente) são superiores às determinadas para a matéria-prima reciclada (229,48 J/g e -187,30J/g, respetivamente) o que mostra que o reprocessamento deste polímero parece produzir algumas alterações na estrutura macromolecular.

O grau de cristalinidade do POM, que está diretamente relacionado com a entalpia de cristalização, tem tendência a diminuir de 80 a 75% quando se passa da matéria-prima virgem para a reciclada.

No seu conjunto os resultados do estudo do POM evidenciam que as formulações deste polímero são pouco afetadas pela variação do teor de reciclado usado nas mesmas formulações, designadamente no que se refere ao seu comportamento reológico (MFI) e ao comportamento mecânico do elemento do rolamento fabricado com estas formulações. Embora o POM virgem e o POM reciclado tenham evidenciado diferenças nas suas entalpias de fusão, de cristalização e nos seus graus de cristalinidade, que estão em linha com a ocorrência de alguma degradação a nível da estrutura macromolecular induzida pelo reprocessamento, esse facto não se refletiu em alterações expressivas da reologia do polímero ou da tensão máxima suportada pelo elemento de interesse do rolamento.

## 6.2 Análise do comportamento mecânico, reológico, térmico e microestrutural da PA66-30GF

O estudo do comportamento mecânico do elemento inferior do rolamento (Figura 47), fabricado como PA66-30GF, revelou que a presença de reciclado tem uma forte influência na sua resistência mecânica diminuindo-a em cerca de 18% (30 MPa) no caso mais extremo (substituição integral da matéria-prima virgem por reciclado). Esta é uma influência negativa que deve ser acautelada por tratar-se do componente mais importante na constância das propriedades do rolamento.



Estudou-se também o efeito da adição de reciclado no comportamento reológico do polímero (ensaios de medida de MFI) e os resultados obtidos mostraram que, também neste caso, o efeito do reciclado é perceptível: tal como a Figura 48 ilustra, foi possível concluir que à medida que a percentagem de reciclado aumenta, o valor de MFI também aumenta.

Uma vez que a matéria-prima é um compósito, o problema reside em compreender qual dos constituintes desta matéria-prima fragiliza, de facto, a resistência mecânica com o reaproveitamento do material. Assim sendo, foi feito um ensaio de MFI para perceber se existia alteração do valor de MFI face à alteração da percentagem de matéria-prima reciclada. Este tipo de ensaio não é de o mais apropriado para um compósito face à existência de fibras que terão de atravessar a estreita fieira, além do mais este compósito, por ser constituído por poliamida tem tendência a absorver um elevado teor de humidade, que não foi possível quantificar e controlar, dificultando o ensaio. No entanto, através da Figura 48 foi possível confirmar que à medida que a percentagem de reciclado diminui, o valor de MFI também diminui, ou seja, à medida que a componente vai deixando de ter reciclado a sua viscosidade aumenta. Perante esta situação podem formular-se duas hipóteses: no caso da matriz, podemos admitir que a reciclagem degrada as moléculas tornando-as mais pequenas, o que faz aumentar a fluidez; no caso do reforço podemos admitir que, com o recorrente processamento, as fibras de vidro se possam degradar.

Embora haja alguma reserva quanto a adequabilidade dos testes de MFI ao estudo do comportamento reológico de compósitos, uma vez que a fase de reforço pode dificultar o escoamento do polímero na fieira, os resultados obtidos com a PA66-30GF mostram não só que o ensaio é exequível como também é possível analisar o comportamento das formulações com diferentes teores de reciclado numa base comparativa. A interpretação dos resultados obtidos poderá assentar na hipótese de as macromoléculas do polímero sofrerem alguma degradação térmica com o reproprocessamento, o que se refletiria na viscosidade do polímero que diminuiria com consequente aumento do MFI ou, alternativamente, na hipótese de que ocorre degradação das fibras promovida pelo reproprocessamento da PA66-30GF ou ainda no acoplamento das duas hipóteses.

A análise do efeito da inclusão de reciclado na matéria-prima, através do estudo do comportamento térmico por DSC das amostras de PA66-30GF (Figura 49), não evidenciou alterações significativas nem nas temperaturas nem nas entalpias associadas à fusão ou cristalização do polímero, o que não permite sustentar a hipótese de degradação térmica do polímero com o reproprocessamento.





A avaliação da microestrutura de amostras de matéria-prima virgem (Figura 51) e da matéria reciclada (Figura 53) evidenciou diferenças significativas na superfície das fibras de vidro: a espessura e a rugosidade da camada que reveste superficialmente as fibras no caso da matéria-prima virgem contrasta com a camada mais fina e mais lisa observada no caso da PA66-30GF reciclada. Observou-se também que, com o reprocessamento, as fibras tendem a ficar mais curtas.

Como foi referido no capítulo Revisão da Literatura, a Pa66-30GF é um compósito em que a interface entre a fase de reforço (fibra de vidro) e a matriz polimérica tem um papel importante na resposta do compósito a solicitações mecânicas. Quando as ligações químicas entre o agente de acoplamento e a matriz polimérica são afetadas, a adesão da matriz à fase de reforço fica comprometida<sup>71</sup>. Como as Figura 57 e Figura 58 (figuras referentes à PA66-30GF virgem e reciclada, respetivamente) documentam, o compósito constituído por matéria-prima virgem denota a existência de uma camada interfacial espessa, o que traduz uma boa aderência entre fibra de vidro e matriz polimérica. Verificou-se também, em ambos os casos, a existência de vazios na matriz tal como se pode verificar na Figura 50 e Figura 52, vazios esses difíceis de quantificar. Apesar de não estar totalmente documentado pelas imagens de SEM a geometria dos vazios deixados pelo arrancamento das fibras de vidro, que se evidenciaram como círculos praticamente perfeitos na matriz 100% reciclada e como círculos com maior deformação ou mais irregulares na matriz 100% virgem. A geometria circular quase perfeita (Figura 52) revela uma fraca aderência ou fracas interações ao passo que um arrancamento que incute uma geometria mais irregular revela uma maior aderência que ocasiona uma maior deformação plástica à matriz. Estes argumentos também explicam as melhores propriedades mecânicas das formulações com matéria-prima virgem ou baixo teor de reciclado, que se devem à boa aderência entre reforço e matriz.

Apesar de suportarem o efeito do reciclado nas propriedades mecânicas do compósito PA66-30GF, os argumentos anteriores são insuficientes para explicar o efeito do aumento de teor de reciclado no comportamento reológico observado. O aumento do MFI com o aumento de reciclado denota um aumento de fluidez que poderia dever-se em parte ao encurtamento das fibras ou a uma hipotética degradação do polímero durante o reprocessamento que, porém, não é detetada nos registos DSC das formulações com matéria-prima virgem e reciclada dado não existirem diferenças entre eles. Uma possível explicação para este facto é que a elevada quantidade de fibra de vidro nas formulações (30%) tenha um efeito “tampão” nos registos DSC que dificulte a deteção de hipotéticas alterações associadas à degradação do polímero. Este é

um aspeto que não está totalmente clarificado no presente estudo e que merece ser aprofundado.

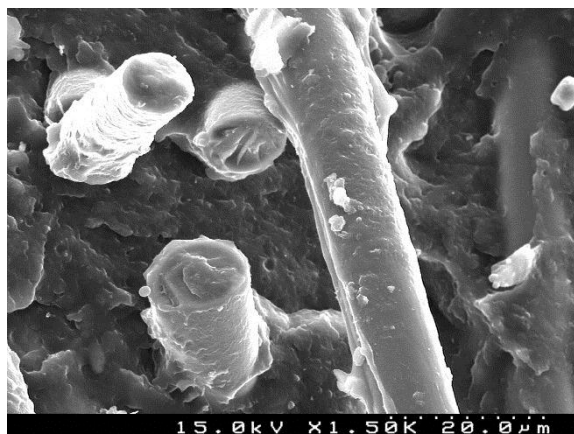


Figura 57 – Micrografia obtida através do ensaio de SEM relativamente à superfície do compósito 100% virgem numa ampliação de 20  $\mu\text{m}$ .

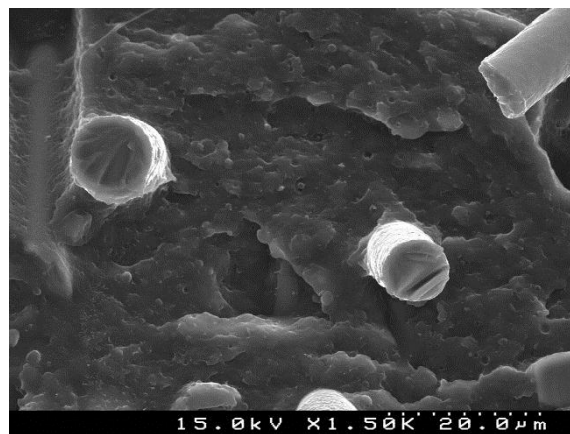


Figura 58 – Micrografia obtida através do ensaio de SEM relativamente à superfície do compósito 100% reciclado numa ampliação de 20  $\mu\text{m}$ .

## 6.3 Comportamento mecânico do rolamento polimérico

### 6.3.1 *Análise da rugosidade superficial*

Devido à variação de carga a que os rolamentos estão expostos, é importante quantificar a rugosidade prever possíveis problemas de abrasão e fadiga. Neste caso em concreto, o elemento superior, devido à interação que apresenta com o anel e devido, também, ao seu aspeto superficial peculiar, é o elemento mais revelante no estudo do desgaste e acabamento final (rugosidade).

Analisando os resultados rugosidade superficial apresentados na Tabela XVII, e tendo em conta o valor máximo de Ra permitido, admite-se a existência de zonas com imperfeição, designadamente zonas próximas dos pontos de injeção, que comprometem a interação entre o elemento inferior e o anel do rolamento, conduzindo a uma resposta mecânica diferente da oferecida pelas restantes zonas com uma rugosidade superficial dentro dos parâmetros desejáveis.

De forma a contornar este problema e a baixar o Ra, fizeram-se diversas alterações, tanto no molde como nos parâmetros de injeção. O polimento e eliminação de quinas ativas no molde, facilitaram o escoamento do polímero (POM) nos canais e a sua distribuição pela cavidade. Relativamente aos parâmetros de injeção, aumentou-se a velocidade de injeção para minimizar a tendência do material solidificar logo junto à zona de injeção, permitindo que se



espalhasse de uma forma mais equilibrada e uniforme, levando deste modo a uma correta solidificação e um ótimo acabamento superficial.

Com a alteração destes parâmetros, o acabamento superficial melhorou significativamente (Tabela XVIII), conseguindo-se baixar a rugosidade média ( $R_a$ ) não só nas zonas críticas mas também noutras zonas que anteriormente já se encontravam dentro de especificação, diminuindo assim a média dos valores de  $R_a$  ao longo de toda a superfície da peça de 0,126 para 0,039  $R_a$ . Constatou-se assim que foi possível assegurar à superfície do elemento do rolamento um valor de  $R_a$  abaixo do limite exigido ( $R_a > 0,1$ ) garantindo, deste modo, uma interação eficaz entre os dois elementos que permitirá ao rolamento um funcionamento adequado. Como último comentário, dado que a rugosidade do elemento fabricado com POM é muito vulnerável às condições do próprio molde, a manutenção deste é uma condição de primordial importância no contexto do controlo daquela característica.

### 6.3.2 *Momento de Força ou Torque*

O torque medido neste trabalho serviu para definir um valor, objetivo, que estabeleça um limite para os rolamentos que estão dentro das especificações de funcionamento. A prática da empresa recorre a ensaios não *standard* e que são dependentes de uma análise subjetiva dos operadores que analisam o rolamento como um todo e o classificam como “go” ou “no-go”.

Estes resultados, expressos nas Figura 54, Figura 55 e Figura 56, mostram que para um rolamento em perfeitas condições, o torque não deve exceder 1 N.m.

A causa para as variações observadas no valor do torque é atribuída, essencialmente, às instabilidades dimensionais que o POM apresenta devendo-se assinalar que este termoplástico pode contrair até 3%. Já a PA66-30GF, devido às suas características e também à presença de fibras de vidro, apresenta uma contração de 0,3%. Isto significa que, se o elemento inferior estiver próximo dos seus limites máximos exigidos no diâmetro mais exterior e o elemento superior estiver próximo dos seus limites mínimos do diâmetro exterior, haverá dificuldade em colocar o elemento inferior no interior do elemento superior de modo a rodar com facilidade visto que os elementos estão desde logo em contacto uma com a outra, colocando assim o valor de torque acima de 1 N.m.

Para evitar que o torque ultrapasse esse limite é preciso fazer uma análise ao processo desde a entrada do polímero na injetora até ao controlo metrológico, analisando as variáveis de injeção, as variáveis de arrefecimento após desmoldação e a percentagem real de contração que



cada peça sofre. Assim, será possível alterar parâmetros de modo a que a peça fique nas cotas desejáveis e estas não interfiram nos valores do torque.

Uma vez que os operadores determinam manualmente e com base na experiência se o rolamento está dentro das especificações “go” ou não “no-go, um ensaio deste tipo pode conferir objetividade a esta operação de controlo.

## Capítulo 7

# Conclusões e Trabalhos Futuros



O estudo que se conduziu no contexto do estágio realizado na *Moldoeste II* permitiu caracterizar as matérias-primas utilizadas na produção de rolamentos poliméricos, designadamente as duas matérias-primas fundamentais para a estabilidade mecânica do produto, o POM e a PA66-30GF, sendo esta última um compósito de matriz polimérica com fibra de vidro. Ambas foram caracterizadas do ponto de vista mecânico, térmico e reológico, quando usadas em formulações com diferentes teores de reciclado.

Os testes mecânicos demonstraram que à medida que a percentagem de reciclado aumenta as formulações de POM mantêm uma tensão máxima estável ao passo que formulações de PA66-30GF tendem a apresentar valores mais baixos de tensão, influenciando a resistência do rolamento.

Por outro lado, quer no POM quer na PA66-30GF, as análises por calorimetria diferencial de varrimento não evidenciaram diferenças significativas entre o comportamento térmico do material virgem e o reciclado. Para além desta técnica de caracterização, recorreu-se à medição do MFI para estudar a reologia das formulações de POM e da PA66-30GF e indiretamente monitorizar as suas viscosidades. Observou-se que os diferentes teores de reciclado não afetaram a reologia das formulações com POM ao passo que as formulações da PA66-30GF evidenciaram uma tendência de diminuição de viscosidade com o aumento da percentagem de reciclado.

O conjunto de resultados obtidos na caracterização do POM indicam pois que as propriedades aqui estudadas não são significativamente afetadas pelo reprocessamento do material, sendo pouco expressivas as diferenças de comportamento entre material virgem e material reciclado.

No que se refere ao compósito PA66-30GF, em que o teor de reciclado afeta apreciavelmente o comportamento mecânico e reológico das suas formulações, o estudo do impacto do seu reprocessamento na sua microestrutura, analisada por microscopia eletrónica de varrimento (SEM), revelou por um lado que as fibras tendem a ficar mais curtas e que, por outro lado, a qualidade da interface entre a fase de reforço e a matriz se degrada com a reciclagem: as alterações observadas por SEM na espessura e rugosidade da camada que reveste as fibras demonstram diferenças nas condições de adesão entre fibra e polímero que parecem ser mais fortes no caso da PA66-30Gf virgem. Estes argumentos podem não ser suficientes para explicar o efeito do reciclado no comportamento reológico da PA66-30GF cujo MFI aumenta com o aumento de reciclado, sem que contudo se detete qualquer diferença significativa entre as curvas DSC de material virgem e do material reciclado. Este é um aspeto que merece ser aprofundado em estudos posteriores.



A caracterização da rugosidade da superfície do elemento inferior do rolamento revelou que o Ra em certas zonas excedia o valor limite pré-estabelecido, sugerindo a possibilidade de o rolamento apresentar no futuro problemas de atrito. Procurando-se solucionar este problema, e feitas alterações ao molde e aos parâmetros de injeção, conseguiu-se baixar o Ra para valores situados no intervalo de especificação.

Com o estudo do torque determinou-se o limite que garante o bom funcionamento do rolamento. O facto de se ter quantificado esse limite, 1 N.m, garante aos operadores a possibilidade de avaliar se o rolamento está operacional para ser embalado e entregue ao cliente.

O conjunto de resultados obtidos no decorrer do presente estudo, forneceram contributos para o bom desenvolvimento do produto e otimização da sua eficácia.

Conclui-se assim que o rolamento analisado ao longo do estágio integra matérias-primas adequadas à sua funcionalidade, sendo no entanto necessário ter em atenção a percentagem de reciclado de forma a obter melhores propriedades mecânicas.

A temática abordada ao longo deste estágio evidenciou novas perspetivas para investigação no futuro. Assim, uma vertente importante a explorar seria aprofundar o estudo deste rolamento ao nível tribológico, através da realização de ensaios em que o desgaste e a lubrificação fossem testados e comparados relativamente ao comportamento do rolamento de metal.

Para além disso, a investigação deveria aprofundar o estudo da composição das matérias-primas, uma vez que as matérias-primas abordadas incorporam uma percentagem de reciclado que não é controlada nem quantificada e, no caso da PA66-30GF o seu aproveitamento deve ser efetivamente ponderado; alternativamente, e de modo a obter menores custos durante o processamento e o reaproveitamento, seria também pertinente analisar outro tipo de materiais que possam ser menos afetados pela reciclagem e/ ou apresentar um comportamento mecânico eficaz face ao seu processamento.

Recomenda-se a implementação de técnicas de medição de torque em rolamentos.

A curto-médio prazo seria pertinente realizar cartas de controlo e estudos de repetibilidade e reprodutibilidade, designados de estudos R&R, de forma a verificar se as peças, através da alteração controlada da percentagem de reciclado, sofrem variações dimensionais significativas.



## Referências bibliográficas

- (1) Moldoeste, G., Grupo Moldoeste <http://www.grupomoldoeste.com/> (accessed Nov 16, 2013).
- (2) Costa, H. N. da. A influência de aditivos na composição dos termoplásticos <http://www.moldesinjeaoplasticos.com.br/influenciadeaditivos.asp>.
- (3) NSK, Motion & Control, Introdução aos Rolamentos <http://www.br.nsk.com> (accessed Dec 4, 2013).
- (4) FAG, Rolamentos de rodas - Automóveis ligeiros [Catálogo]. Luk Aftermarket Service, S. L., Madrid 2006, 2–3; 6.
- (5) SKF, G.. *Rolling bearings*; 2012, PUB BU/P1 10000 EN; pp. 22–39.
- (6) Karl Benz [http://en.wikipedia.org/wiki/Karl\\_Benz](http://en.wikipedia.org/wiki/Karl_Benz) (accessed Jan 12, 2014).
- (7) Motor Consult, Constituição básica de um automóvel, 2012 <http://www.motorconsult.pt> (accessed Jan 13, 2014).
- (8) Schaeffler. *Tecnologia Criativa para Veículos*; Integra, Ed.; L/OEM-MT 0.; Sorocaba, 2012; pp. 11–16.
- (9) Bell, S. L. The Classification of Ball Bearings , Roller Bearings and Parts Thereof, 2012, pp. 7–17.
- (10) NSK, G., Rolamentos e Produtos Automotivos [Catálogo UOEM01], 2005, 1–11.
- (11) SNR, Suspension - Bearings and kits [Catálogo]. *SNR Group*, 2007, [www.snr-bearings.com](http://www.snr-bearings.com), 2–8.
- (12) NTN. Suspensão automóvel <http://www.ntn-snr.com> (accessed Nov 29, 2013).
- (13) SKF, G., Suspension bearing solutions Contents [Catálogo], PUB 10/P2 12714 EN, China 2012, 4–32.





- (14) SNR, G. O Diagnóstico Perito SNR: Análise e Preconizações para otimizar a vida dos rolamentos, *Publicis Alpes*. 2003, pp. 6–30.
- (15) SKF, G. Polymer ball bearings <http://www.skf.com> (accessed Jan 6, 2014).
- (16) Crawford, R. J. *Plastics ENGINEERING*; Heinemann, B., Ed.; Third edit.; Boston, 1998; pp. 12–14; 18–36; 278–285.
- (17) Rosato, D. V.; Rosato, D. V. *Injection molding handbook*; Hall, C. &, Ed.; Second Edi.; New York, 1995; pp. 1–5; 23–23; 814; 863–865.
- (18) Tecmaplast. Technical Know-How <http://www.tecmaplast.fr> (accessed Jun 14, 2014).
- (19) Quaglini, V.; Dubini, P.; Ferroni, D.; Poggi, C. *Mater. Des.* **2009**, *30*, 1650–1658.
- (20) Hartford T. Plastic Bearings <http://www.hartfordtechnologies.com> (accessed Jan 6, 2014).
- (21) Solticzky, J.; Bíró, I. *Ann. Fac. Eng. Hunedoara - Int. J. Eng.* **2011**, *9*, 379–381.
- (22) Fried, J. R. *Polymer science and technology*; Hall, P. P., Ed.; New Jersey, 1995; pp. 291; 338–339; 345–346.
- (23) BASF. Processing Data Sheet - Ultraform N2320 0035, 2013, BASF SE, Germany 2012.
- (24) BASF. Product Information - Ultraform N2320 0035, BASF SE, Germany 2012.
- (25) BASF. Ultraform (POM) – Product Brochure [Catálogo], BASF SE, 10 – 20.
- (26) Feldman, D.; Barbalata, A. *Synthetic Polymers - Technology, properties, applications*; Hall, C. &, Ed.; First edit.; by Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK: London, 1996; pp. 3–27; 106; 222–236; 814.
- (27) Polytetrafluoroethylene <http://en.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluoroethylene> (accessed Jan 14, 2014).
- (28) Khedkar, J.; Negulescu, I.; Meletis, E. I. *Wear* **2002**, *252*, 361–369.



- (29) Visjager, J. F. Ultra-High Molecular Weight Polymers, Eindhoven University of Technology, 2001, pp. 5–6.
- (30) Abreu, C. S. de. Comportamento tribológico de compósitos bioativos de nitreto de silício para aplicações em próteses articulares, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000, pp. 1–2.
- (31) Typical properties of polyethylene. *International Association of Plastics Distributors*, 1 – 2.
- (32) Laranjeira, S. M. Estudo do Comportamento ao Atrito e Desgaste de Poliamidas, Universidade de Aveiro, 2011, pp. 9–20.
- (33) Strong, A. B. *Plastics Materials and Processing*; Prentice-Hall, Ed.; New Jersey, 1996; pp. 188 – 192.
- (34) Paulo Davim, J.; Silva, L. R.; Festas, A.; Abrão, A. M. *Mater. Des.* **2009**, *30*, 228–234.
- (35) D. H. Morton-Jones. *Polymer processing*; Hall, C. and, Ed.; First.; USA: London, 1989; pp. 55–58; 146–153; 149.
- (36) J. A. Brydson. *Plastics Materials*; Butterworths, Ed.; 5ª ed.; London, 1989; pp. 118–149.
- (37) Baijal, M. D. *Plastics Polymer Science and Technology*; Sons, J. W. &, Ed.; New York, 1982; pp. 621 – 645.
- (38) Costa, H. N. da. Moldes Injeção Plásticos <http://www.moldesinjecaoplasticos.com>.
- (39) Saron, C.; Felisberti, M. I. Ação de colorantes na degradação e estabilização de polímeros, Universidade Estadual de Campinas: Campinas, 2005, Vol. 29, pp. 124–125.
- (40) Defense, D. of. *Composite Materials Handbook*; Volume 3.; AMSC: United States of America, 2002; Vol. 3, pp. 2–5 – 2–11.
- (41) Hollaway, L. *Glass Reinforced Plastics in Construction: Engineering Aspects*; Press, S. U., Ed.; First.; Glasgow, 1978; pp. 1–12; 67–84.



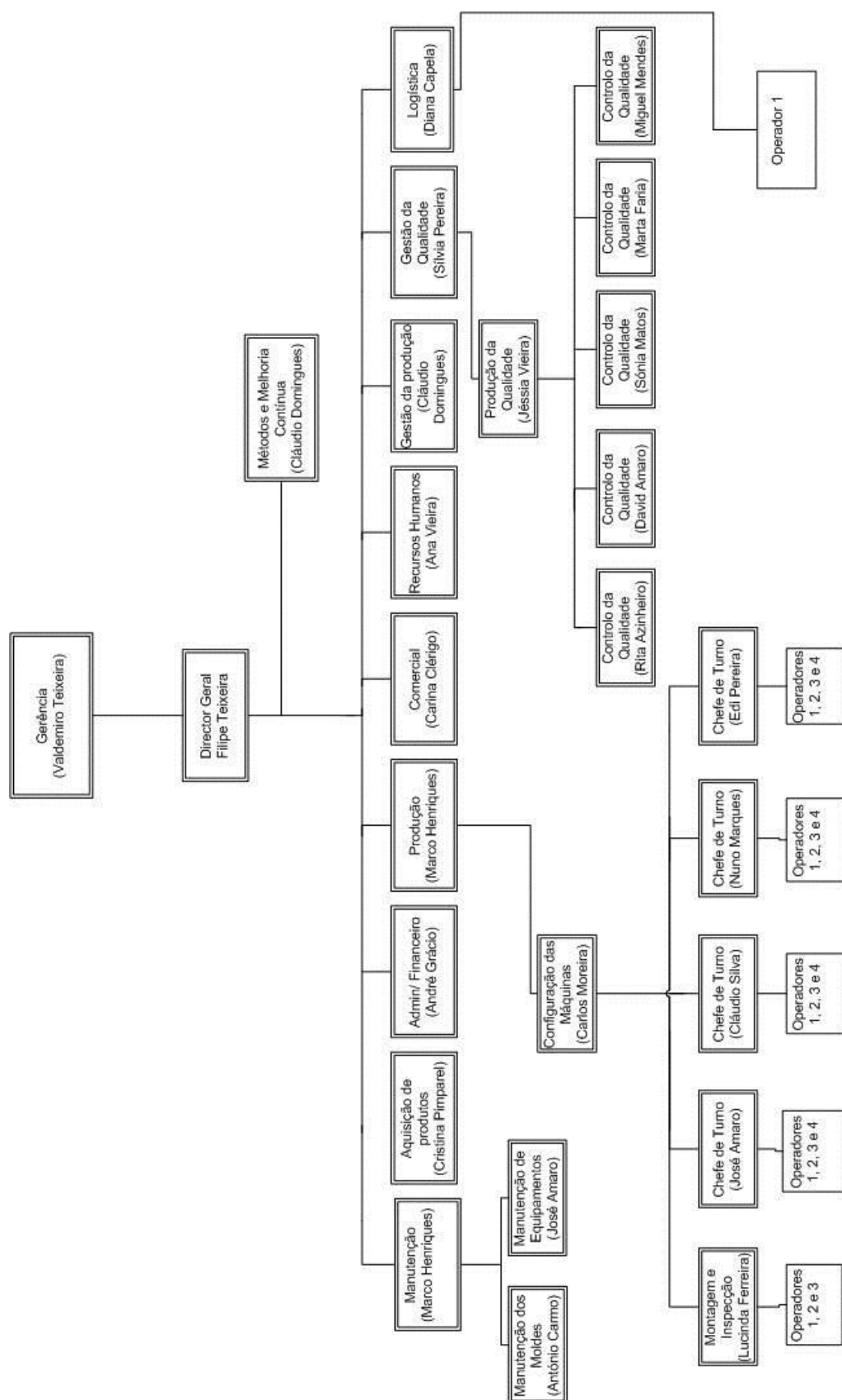
- (42) Thomason, J. L. Interfaces and interfacial effects in glass reinforced thermoplastics, University of Strathclyde, 2007, pp. 78–80.
- (43) Ishida, H. Controlled interphases in glass fiber and particulate reinforced polymers: Structure of silane coupling agents in solutions and on substrates, Case Western Reserve University, 1993, p. 173.
- (44) Gelest. Silane Coupling Agents: Connecting Across Boundaries, 2006, 7.
- (45) Xu, X. Cellulose Fiber Reinforced Nylon 6 or Nylon 66 Composites, Georgia Institute of Technology, 2008, p. 11.
- (46) Eriksen, E. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **1999**, 39, 1611–1618.
- (47) BASF. Product Information - Ultramid<sup>®</sup> A3EG6, BASF SE, Germany 2014.
- (48) Sinotech. Injection Molded <http://www.sinotech.com> (accessed Jan 14, 2014).
- (49) Theilade, U. A.; Hansen, H. N. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2006**, 33, 157–158.
- (50) Bayer. No Title Processing data for the injection molder. *MaterialScience, Bayer*, 2005, 40–50.
- (51) Lucchetta, G.; Fiorotto, M. *J. Mech. Eng.* **2013**, 59, 683–688.
- (52) Bociaga, E.; Palutkiewicz, P. The Influence of Injection Molding Parameters and Blowing Agent Addition on Selected Properties , Surface State , and Structure of HDPE Parts, Czestochowa University of Technology, 2012, pp. 0–1.
- (53) Plastics, G. Injection Moulding - min guide [Catálogo], 1998, 40–66.
- (54) Demag. La inyección en forma breve y sucinta [Catálogo], 2004.
- (55) Company's, R. Polyamide 66 [http://www.ides.com/pm/8\\_pa66.asp](http://www.ides.com/pm/8_pa66.asp) (accessed Jun 3, 2014).
- (56) BASF. Processing Data Sheet - Ultramid A3EG6, BASF SE, Germany 2013.



- (57) Chemicals, M. Lubmer - A Special Polyolefin Resin with Superb Sliding Properties, 2011, 3–7.
- (58) Standards, B. *Int. Stand.* **2005**, *Fourth Edi*, 2; 12.
- (59) Equipment, D. test. Melt Flow IndexerMFI-9, 2014, 1; 3.
- (60) Bruno, A. S. M. Síntese e estudos estruturais de novos materiais luminescentes, Universidade de Aveiro, 2009, p. 164.
- (61) Santana, R. C. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) [http://chasqueweb.ufrgs.br/~ruth.santana/analise\\_instrumental/aula2l.html](http://chasqueweb.ufrgs.br/~ruth.santana/analise_instrumental/aula2l.html).
- (62) Differential Scanning Calorimetry; First and Second Order Transitions in Polymers, 1.
- (63) Capítulo IV - Técnicas de Caracterização Experimental, 27.
- (64) Carvalho, C. L. De; Silveira, A. F.; Rosa, S. *SpringerPlus J.* **2013**, 2:623, 2.
- (65) Lu, H.; Xu, X.; Li, X.; Zhang, Z. *Indian Acad. Sci.* **2006**, 29, 486.
- (66) Group, TESA. Surface Roughness Testing. p. J10.
- (67) Mahr. Surface Texture Measuring Instruments and Systems [Catálogo], 9.
- (68) IMADA. Cap Torque Tester - Series DTX2 <http://www.imada.com/torque-testers/cap-torque/dtx2/> (accessed Sep 2, 2014).
- (69) Dias, K. P. Sistema de alimentação em moldes <http://www.moldesinjecaoplasticos.com>. (accessed Sep 2, 2014).
- (70) Zhang, L. L.; Goh, S. H.; Lee, S. Y.; Hee, G. R. *Polymer (Guildf)*. **2000**, 41, 1439.
- (71) Rzatki, F. D. Modificação de superfície de fibra natural inorgânica para utilização como reforço e poli(tereftalato de butileno), Universidade Federal de Santa Catarina, 2012, pp. 23–37.

Anexos

## Anexo I – Organograma da Moldoeste II



## Anexo II – MFI

POM – Lote 1		
Nº de amostras	Peso (g)	MFI (g/10min)
1	0,2565	10,26
2	0,2515	10,06
3	0,2532	10,13
4	0,2572	10,29
5	0,2546	10,18
<b>Condições:</b> <u>Amostras</u> – 5; <u>Temperatura</u> – 190°C; <u>Carga</u> – 2,16 kgf; <u>Tempo</u> – 15 segundos		

POM – Lote 2		
Nº de amostras	Peso (g)	MFI (g/10min)
1	0,1726	10,36
2	0,1705	10,23
3	0,1713	10,28
4	0,1737	10,42
5	0,1726	10,36
<b>Condições:</b> <u>Amostras</u> – 5; <u>Temperatura</u> – 190°C; <u>Carga</u> – 2,16 kgf; <u>Tempo</u> – 10 segundos		

PA66-30GF – Lote 1		
Nº de amostras	Peso (g)	MFI (g/10min)
1	0,4888	58,66
2	0,4674	56,09
3	0,4667	56,00
4	0,4238	50,87
5	0,2789	33,47
<b>Condições:</b> <u>Estufa</u> : 12 horas a 75°C; <u>Amostras</u> – 5; <u>Temperatura</u> – 275°C; <u>Carga</u> – 5 kgf; <u>Tempo</u> – 5 segundos		

PA66-30GF – Lote 2		
Nº de amostras	Peso (g)	MFI (g/10min)
1	0,7976	95,71
2	0,7575	90,91
3	0,8018	96,21
4	0,7460	89,52
5	0,7270	87,24
<b>Condições:</b> <u>Estufa</u> : 3 horas a 95°C; <u>Amostras</u> – 5; <u>Temperatura</u> – 275°C; <u>Carga</u> – 5 kgf; <u>Tempo</u> – 5 segundos		

## Anexo III – Relatório de ensaio do POM

### Relatório de ensaio

#### 1. Preparação do ensaio

Matéria-prima: POM

Produto: Ultraform N2320 0035

Máquina: 6 Estufagem: 120°C Horas: 3 Ø Fuso (mm): 40

Nº de cavidades: 2

#### 2. Condições de processamento

Temperatura do cilindro						
	Bico	1	2	3	4	5
V. Nom	190	175	170	170		
Tol. +	-	-	-	-		
Tol. -	-	-	-	-		

Temperatura do molde: 100°C Tempo de ciclo (seg.): 48

Força de fecho (tons): 100 Tempo de injeção: \_\_\_\_\_

Injeção	Pressão (bar)	Velocidade (mm/s)	Posição (mm)
1ª injeção	100	17	68
2ª injeção	100	50	45
3ª injeção	100	50	40
4ª injeção	100	30	35

Pós-pressão	Pressão (bar)	Veloc. (mm/s)	Tempo (seg)
1ª manutenção	90	25	10
2ª manutenção	-	-	-
3ª manutenção	-	-	-

Dosagem	Pressão (bar)	Velocidade (mm/s)	Posição (mm)
1ª dosagem	-	70	70
2ª dosagem	-	-	-
Descompressão	70	40	5

Arrefecimento	Tempo (seg)	Pressão (bar)	Contra-pressão
Retardo dosagem	-	-	-
T. de arrefecimento	25	-	-

#### 3. Observações



## Anexo IV – Relatório de ensaio da PA66-30GF

### Relatório de ensaio

#### 1. Preparação do ensaio

Matéria-prima: PA66-30GF

Produto: Ultramid A3EG6

Máquina: 5 Estufagem: 90°C

Horas: 3 Ø Fuso (mm): 50

Nº de cavidades: 2

#### 2. Condições de processamento

Temperatura do cilindro						
	Bico	1	2	3	4	5
V. Nom	290	280	260	250		
Tol. +	-	-	-	-		
Tol. -	-	-	-	-		

Temperatura do molde: 70°C Tempo de ciclo (seg.): 44

Força de fecho (tons): 140 Tempo de injeção: 2 segundos

Injeção	Pressão (bar)	Velocidade (mm/s)	Posição (mm)
1ª injeção	120	60	40
2ª injeção	120	60	40
3ª injeção	120	50	30
4ª injeção	120	40	28

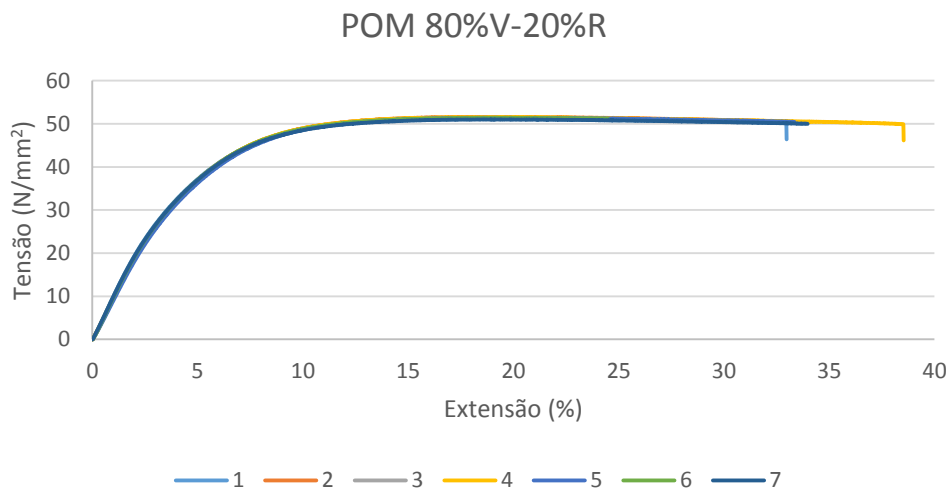
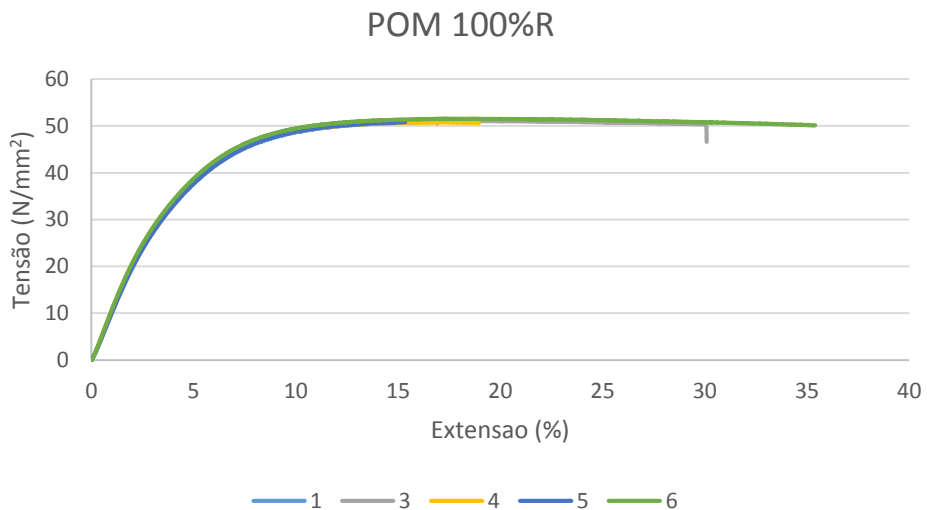
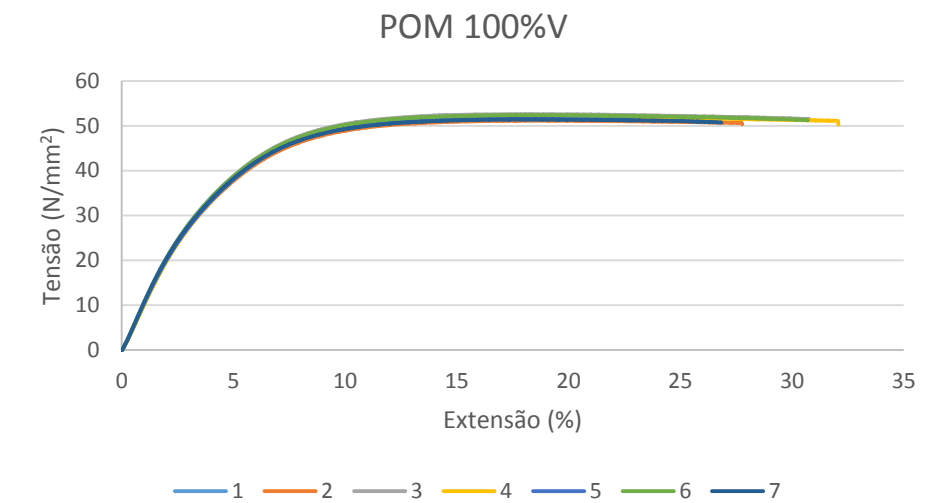
Pós-pressão	Pressão (bar)	Veloc. (mm/s)	Tempo (seg)
1ª manutenção	90	25	5
2ª manutenção	-	-	-
3ª manutenção	-	-	-

Dosagem	Pressão (bar)	Velocidade (mm/s)	Posição (mm)
1ª dosagem	-	80	-
2ª dosagem	-	-	-
Descompressão	60	50	6

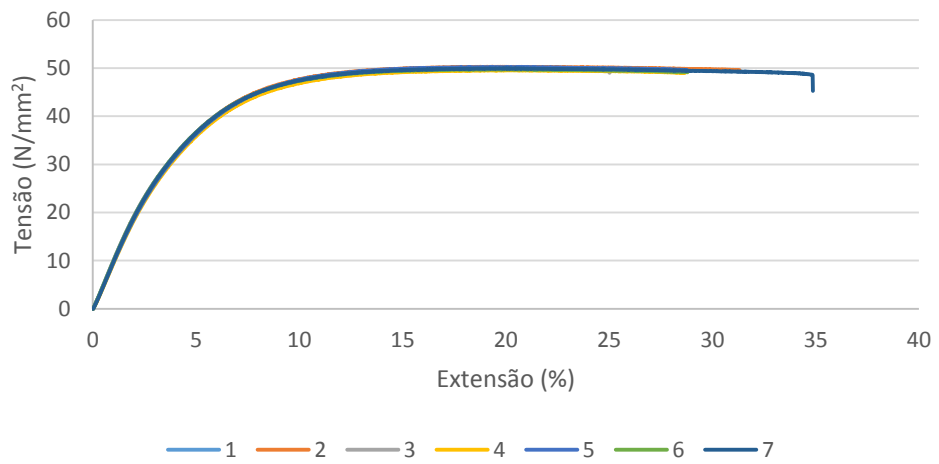
Arrefecimento	Tempo (seg)	Pressão (bar)	Contra-pressão
Retardo dosagem	-	-	-
T. de arrefecimento	25	-	-

#### 3. Observações

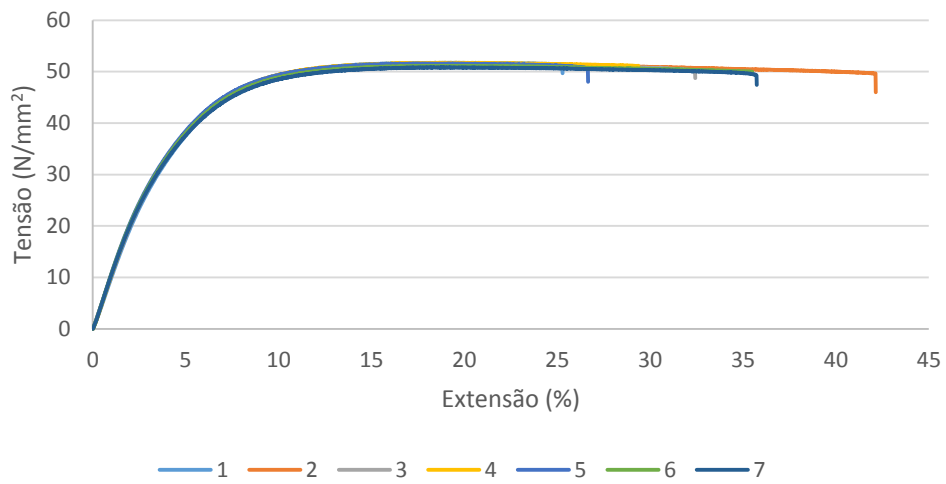
Anexo V – Ensaios de tração



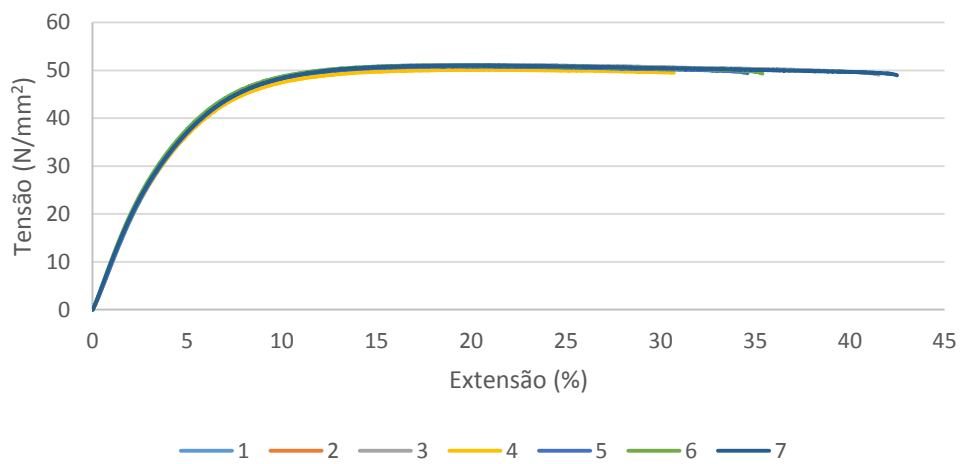
POM 20%V-80%R



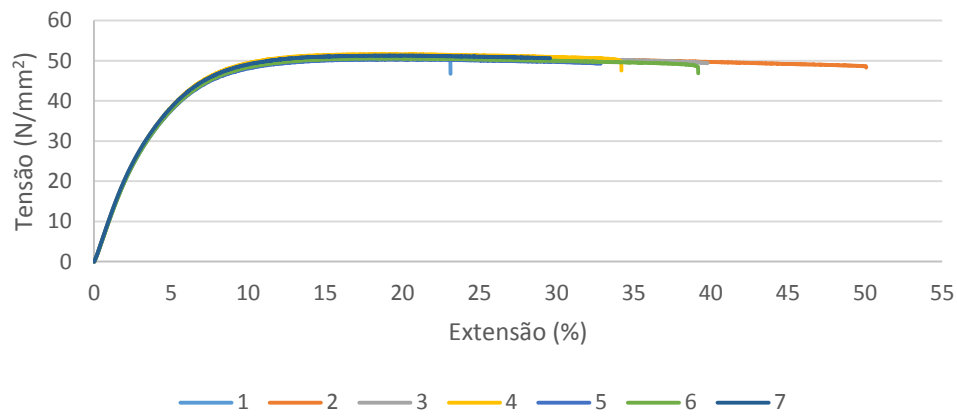
POM 60%V-40%R



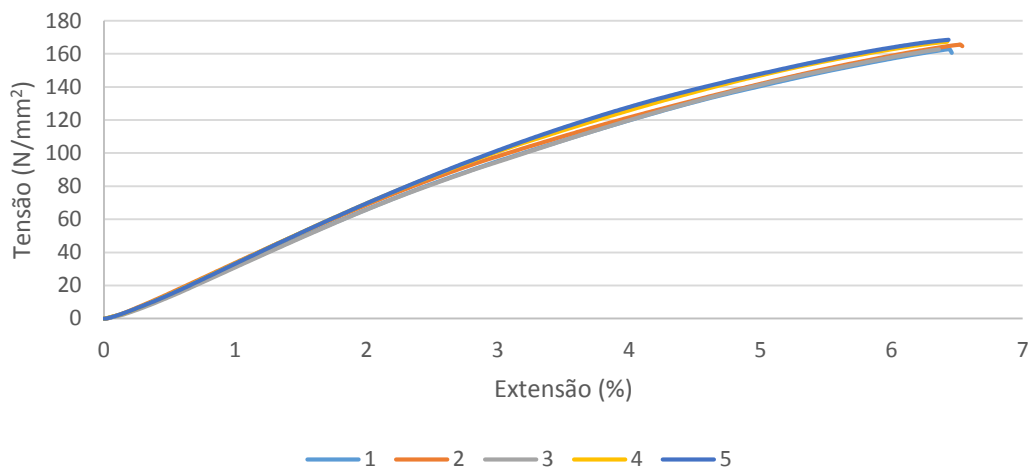
POM 40%V-60%R



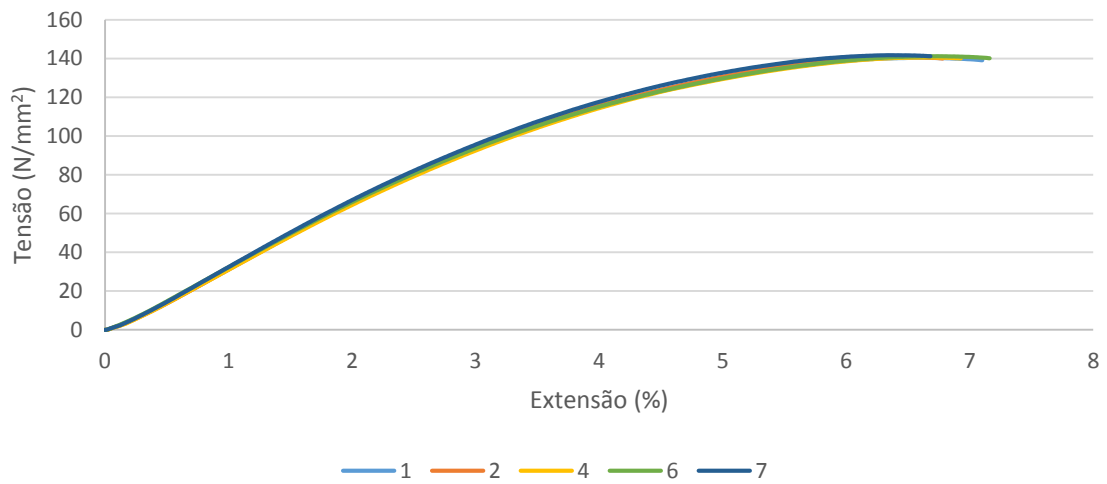
POM 50%V-50%R



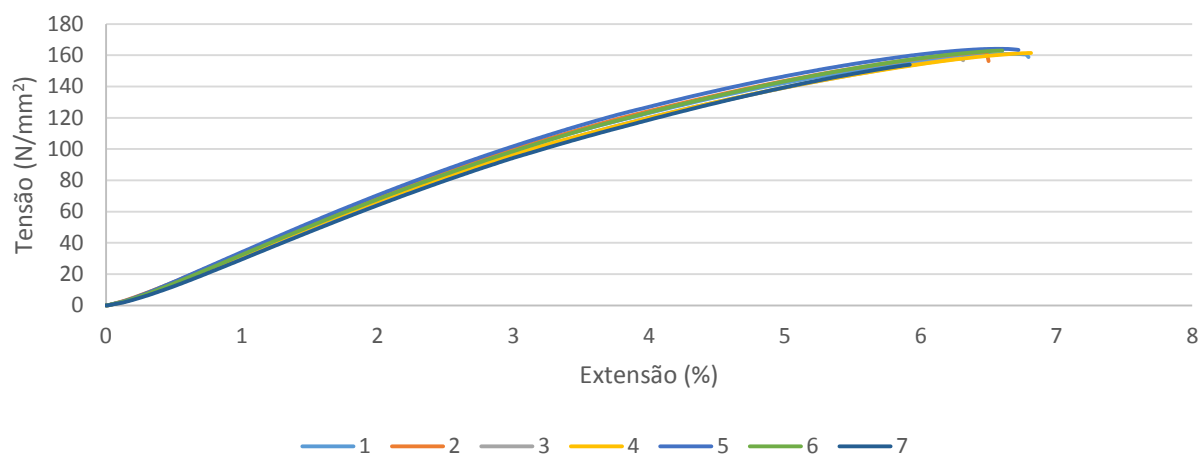
PA66-30GF 100%V



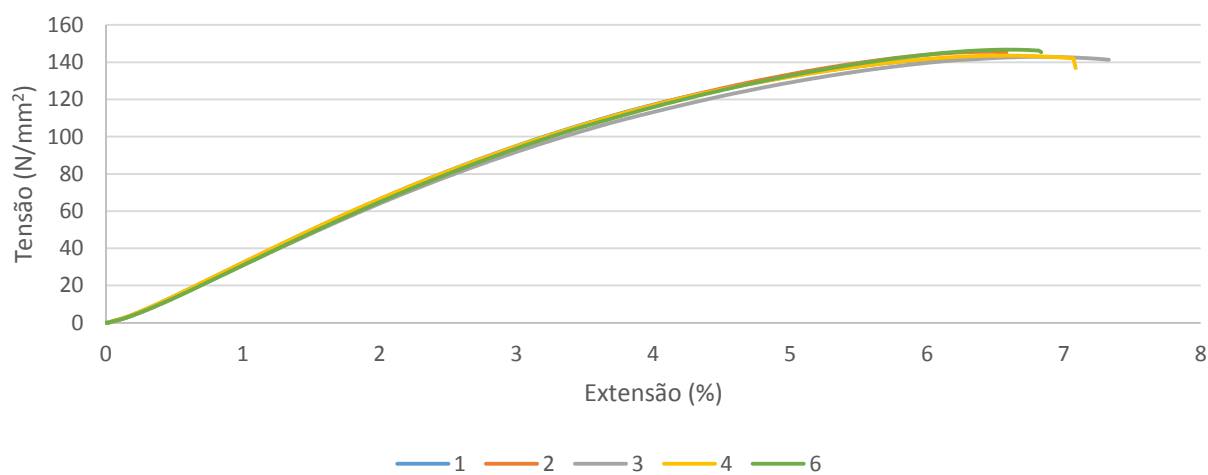
PA66-30GF 100%R



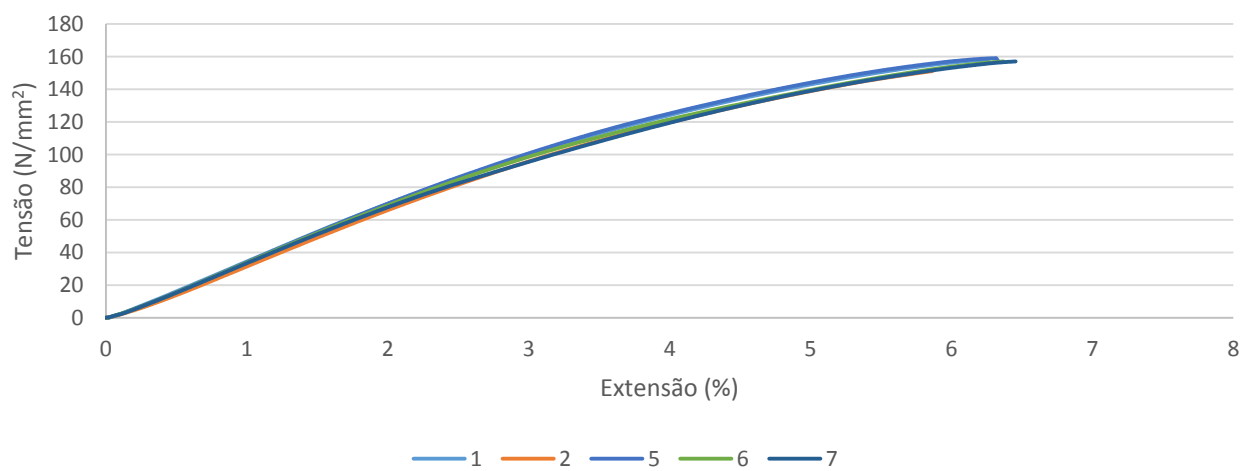
PA66-30GF 80%V-20%R



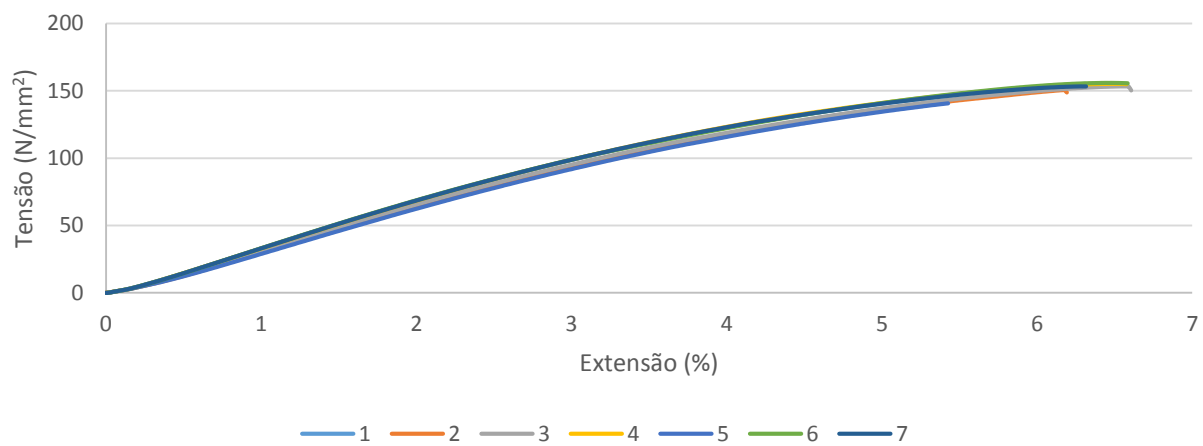
PA66-30GF 20%V-80%R



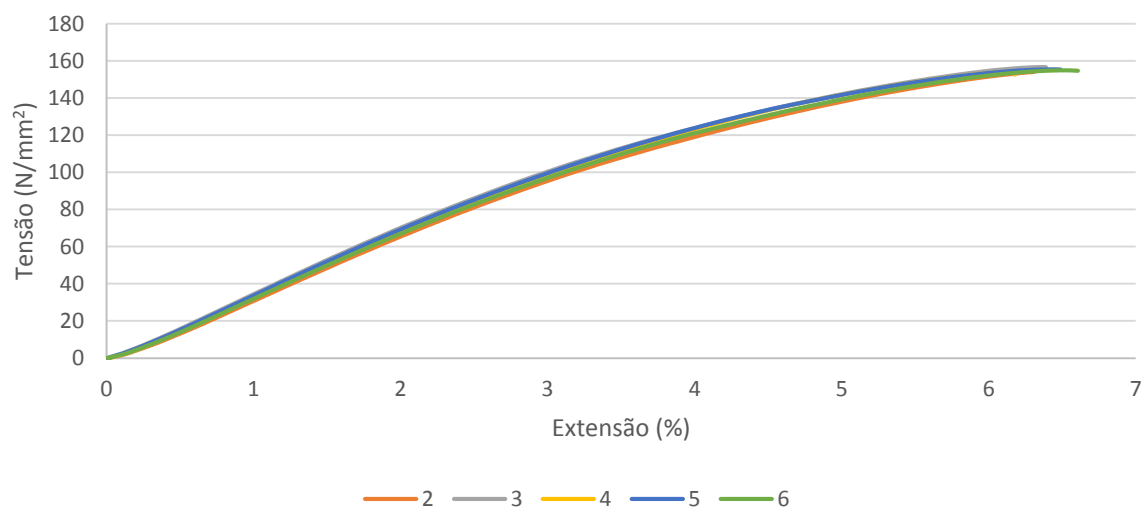
PA66-30GF 60%V-40R%



PA66-30GF 40%V-60%R



PA66-30GF 50%V-50%R



Anexo VI – Momento de torção dos rolamentos poliméricos

